

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

**Plazmová rekrytalizační pec –
modelová analýza elektrostatičkého
pole plazmatronu**
**Plasma furnace – Simulation of
electrostatic field of plasma generator**

Zadání

Prohlášení:

„Prohlašuji, že jsem předloženou diplomovou práci vypracoval samostatně a uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.“

Poděkování:

Na tomto místě bych rád poděkoval panu Ing. Martinovi Markovi, Ph.D. za jeho cenné rady a připomínky k diplomové práci a panu Ing. Danielovi Petlákově za umožnění přístupu k plazmové peci a zapůjčení jednotlivých částí plazmového generátoru.

V Ostravě dne 26. dubna 2010

.....
podpis

Abstrakt:

V této diplomové práci provádím rozbor plazmového generátoru a simulaci elektrostatických poměrů při startu plazmové pece. První část se zabývá vznikem a fyzikálními pochody v nízkoteplotním plazmatu a v el. oblouku. Dále jsou popsány různé typy plazmových hořáků používané v plazmové metalurgii, jejich výhody a nevýhody. Následuje popis reálné plazmové pece pro laboratorní účely a plazmatronu, tvorba modelu a simulace průběhu intenzity el. pole ve výpočetním programu ANSYS pro různé geometrické uspořádání katody.

V závěru je uvedeno porovnání a zhodnocení jednotlivých rozložení a doporučení pro optimální polohu katody vůči pomocné anodě.

Klíčová slova:

Plazma, plazmová pec, plazmový generátor (plazmatron), intenzita elektrického pole, ANSYS, simulace elektrostatického pole, metoda konečných prvků (MKP).

Abstract:

In this Thesis I analyse plasma generator and a simulation of electrostatic proportion at a start of the plasma furnace. The forepart of this Thesis deals with a rise and physical processes in a low temperature plasma and in an electric arch. Further follows a description of a various types of the plasma generators, which are used in the plasma metallurgy, their benefits and disadvantages. Follows a description of a real plasma furnace for a laboratory purposes and a description of the plasmatron, a creation of model and a simulation of an electric field in a computing programme ANSYS. I do the simulation for a various geometry of the cathode.

The last part of the Thesis is mentioned as a comparison and an estimation of a single lays and recommendation for an optimal position of cathode in face of an auxiliary anode.

Keywords:

Plasma, plasma furnace, plasma generator (plasmatron), electric field, ANSYS, simulation of electrostatic field, finite element method (FEM).

Seznam základních použitých symbolů, značek a zkratek:

<i>Symbol</i>	<i>Název</i>	<i>Jednotka</i>
A^+	Kladný iont	
B^-	Záporný iont	
D	El. indukce	(C . m ⁻²)
E	Intenzita el. pole	(V . m ⁻¹)
F	Síla	(N)
I	El. proud	(A)
MHD	Magnetohydrodynamický	
MKP	Metoda konečných prvků	
Q	El. náboj	(C)
R	El. odpor	(Ω)
S	Plocha	(m ²)
T	Termodynamická teplota	(K)
U_i	Ionizační energie	(eV)
U_{ob}	Obloukové napětí	(V)
e	Elementární náboj (1,602 . 10 ⁻¹⁹)	(C)
$el.$	Elektrický	
h	Planckova konstanta (6,626 . 10 ⁻³⁴)	(J . s)
k	Boltzmannova konstanta (1,38 . 10 ⁻²³)	(J . K ⁻¹)
l	Délka el. oblouku	(m)
m	Hmotnost	(kg)
p	Tlak	(Pa)
r	Poloměr el. oblouku	(m)
t	Čas	(s)
x	Stupeň ionizace	(-)
ε	Permitivita	(F . m ⁻¹)
ν	Emitovaná frekvence přechodu	(Hz)
ρ	Objemová hustota el. náboje	(C . m ⁻³)
φ	El. potenciál	(V)

Další specifické symboly, značky a zkratky jsou vysvětleny přímo v textu.

OBSAH:

1. Úvod	7
2. Plazma a jeho fyzikální podstata	8
2.1 Elementární procesy	9
2.2 Sahova rovnice	12
3. Elektrický oblouk	14
3.1 Katodové jevy	16
3.2 Anodové jevy	16
3.3 Sloupec elektrického oblouku	18
3.4 Statická charakteristika elektrického oblouku	19
3.5 Dynamická charakteristika elektrického oblouku	21
3.6 Elektrická jiskra	22
4. Plazmové hořáky	23
4.1 Vysokofrekvenční plazmové hořáky	23
4.2 Plazmové hořáky s nezávislým elektrickým obloukem	24
4.3 Plazmové hořáky se závislým elektrickým obloukem	27
4.4 Kombinované elektrické zapojení plazmových hořáků	29
5. Plazmová rekrystalizační pec	30
5.1 Popis plazmové rekrystalizační pece	30
5.2 Popis plazmového hořáku	35
5.3 Inicie oblouku	37
6. Elektrostatika plazmatronu	40
6.1 Pole nabitě koule	41
6.2 Metody řešení elektrostatických polí	42
6.2.1 Analytické metody řešení	42
6.2.2 Numerické metody řešení	43
7. Příčiny neúspěšného startu plazmatronu	45
8. Tvorba modelu plazmatronu	47
9. Analýza elektrostatických poměrů plazmatronu v programu ANSYS	53
10. Vlastní řešení a výsledky simulace elektrostatického pole	58
11. Závěr	64
12. Literatura	65
13. Obsah přílohy DVD	66

1. Úvod

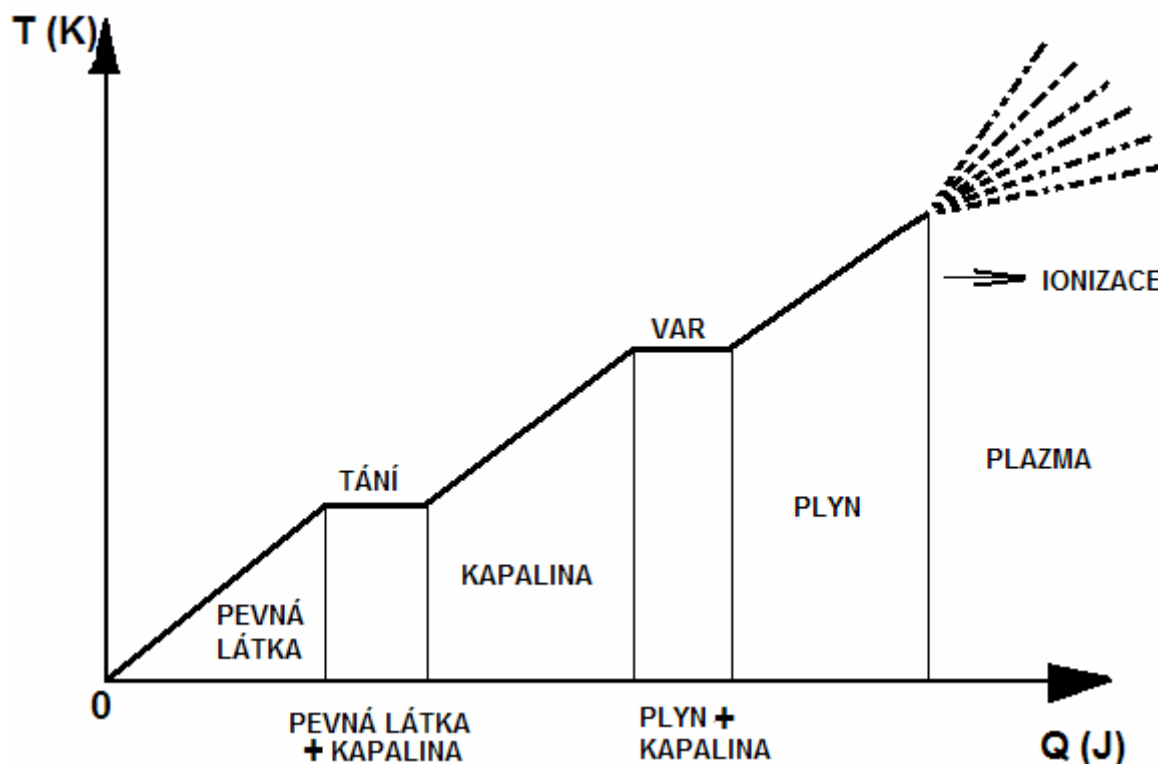
Jakákoliv látka ve vesmíru se může nacházet ve čtyřech různých skupenstvích hmoty: pevná látka – kapalina – plyn – plazma. Aktuální skupenství určuje obsah vnitřní energie, který se navenek projevuje teplotou dané látky. I když se na první pohled může zdát, že čtvrté skupenství hmoty se vyskytuje pouze ojediněle, není tomu tak. Všeobecně se uvádí, že až 99 % veškeré hmoty ve vesmíru existuje v plazmatickém stavu. Máme tedy to štěstí, že se naše Země nachází právě v tom zbývajícím 1 %. [1]

V našich pozemských podmínkách se s přírodním plazmatem můžeme setkat např. v podobě blesku nebo polární záře. Mnohem větší význam má však pro člověka plazma uměle vytvořené, kterého se využívá v celé řadě technických aplikací – zářivky, neonové trubice, plazmové televize, rtuťové usměrňovače a střídače, obloukové svařování, obloukové tavící pece, plazmové pece, plazmomety určené k řezání materiálů s přesností na 0,1 mm, galvanickému pokovování nebo nanášení různých vrstev, plazmové dělo, plazmový motor, MHD generátory pro výrobu elektrické energie i aplikace budoucnosti – řízená termonukleární syntéza.

Plazmové pece se dnes s úspěchem využívají v metalurgickém průmyslu. Jednak jako pece pro zpracování velkého množství roztavené vsázky, a jednak jako pece pro přetavovací pochody, ve kterých se používá malého objemu roztaveného kovu v měděných krystalizátorech chlazených vodou. Tato práce se bude zabývat plazmovou rekrystalizační pecí spadající do druhé kategorie. Ta se nachází na půdě VŠB-TU Ostrava na Katedře neželezných kovů, rafinace a recyklace a slouží pro laboratorní a výzkumné účely.

2. Plazma a jeho fyzikální podstata

Při teplotě 0 K (absolutní nula) se všechny látky ve vesmíru vyskytují pouze v pevném skupenství. Pokud budeme zvyšovat energetický obsah látky, bude její teplota narůstat. V jisté chvíli se vzrůst teploty zastaví a teplo přiváděné do systému se spotřebuje na přeměnu pevné látky v kapalinu. Poté, co se veškerá hmota přemění v kapalném skupenství, začne se opět látka navenek projevovat zvyšováním teploty. V jisté chvíli se opět přestane zvyšovat teplota kapaliny a přiváděná energie se spotřebuje na přeměnu kapaliny v plyn. Až se veškerá kapalina vypaří, začne se znovu příjem energie projevovat rostoucí teplotou plynu. Při dostatečném energetickém obsahu (navenek se projevujícím určitou teplotou, řádově $10^3 - 10^4$ K) bude docházet k ionizaci plynu a vzniku čtvrtého skupenství hmoty – plazmatu (obr. č. 1).



Obr. č. 1 – Závislost termodynamické teploty T na energetickém obsahu látky Q

Plazma je plyn (obecně tekutina), ve kterém se vyskytují volné nosiče náboje v takovém množství, že zásadně ovlivňují fyzikální a chemické vlastnosti všech částic. Navenek se plazma chová neutrálně (kvazineutrálně – počet elektronů a počet kladných iontů je stejný). V plazmatu

vzniká vzájemné elektromagnetické působení mezi nabitými částicemi, přičemž jejich počet je libovolný, ale vždy stejný. V plazmatu se uplatňuje tzv. kolektivní interakce, což znamená, že na každou částici v plazmatu působí ostatní částice (teoreticky všechny ostatní). Důvodem jsou coulombovy síly, které působí na poměrně velké vzdálenosti (klesají se čtvercem vzdálenosti). Díky nim nejsou dráhy částic přímočaré (jako u plynů), ale křivočaré. Plazma je dále charakteristické el. vodivostí, intenzivním vyzařováním a chaotickým pohybem částic. [4]

2.1 Elementární procesy

Přechod látek do plazmatického stavu je doprovázen řadou procesů vzájemného působení mezi jednotlivými částicemi. Obecně tyto procesy označujeme jako elementární. Patří sem excitace atomů, disociace, ionizace (nárazová, tepelná, fotoionizace) a rekombinace. Elementární procesy a jejich vznik jsou základní podmínkou vzniku, udržení a zániku plazmatu.

Excitace atomu

Obecně můžeme srážky mezi částicemi rozdělit do dvou skupin, a to na srážky pružné a nepružné. Při pružných srážkách nedochází ke změně vnitřní struktury, částice si předávají jen kinetickou energii (po takovéto srážce mění částice směr a rychlost). Excitace (vybuzení) atomu nastává při pružných srážkách, kdy atom přijme energii, která je vyšší než nejmenší energie excitace a současně menší než energie ionizační. Atom tuto energii absorbuje, což se projeví přesunem jednoho z elektronů na vyšší energetickou hladinu (dále od jádra). Tento stav je přechodný a po čase řádově 10^{-8} s se atom vrátí do původního stabilního stavu. Při tomto zpětném přechodu dojde k uvolnění energie, která je rovna kvantové přeměně podle vztahu (1).

$$W = h \cdot \nu_p \quad (\text{J}) \tag{1}$$

kde ν_p je emitovaná frekvence přechodu (Hz),

h je Planckova konstanta ($h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$)

Disociace

Vazby mezi atomy v molekulách jsou elastické. Přijme-li molekula z vnějšího prostředí energii, dojde k uvedení jednotlivých atomů do vibračního pohybu. Je-li však tato energie příliš velká, může dojít k rozbití vazeb mezi atomy a k rozštěpení molekuly – disociaci. Energie, která je potřebná pro rozštěpení molekuly, se nazývá disociační energie. Výsledkem disociace mohou být odtržené molekuly, molekulární ionty nebo excitované či ionizované atomy.

Ionizace

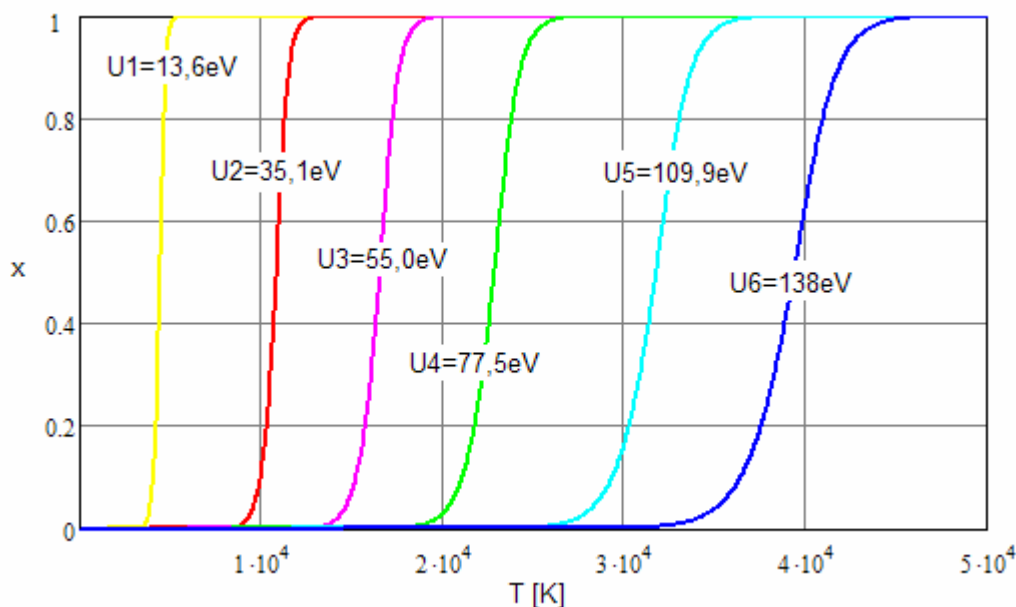
Energetickým působením je možné z atomu odtrhnout jeden nebo více elektronů. Po odtržení vzniknou dvě částice s rozdílným el. nábojem – záporný elektron a kladný iont (kationt). Tento pochod označujeme jako ionizaci a obvykle probíhá při nepružných srážkách, kdy dochází ke změně vnitřní struktury částic. Rozlišujeme ionizaci jednonásobnou (dojde k odtržení jednoho elektronu z elektronového obalu atomu), příp. vícenásobnou (odtržení více než jednoho elektronu). Energie potřebná k odtržení elektronu je rovna vazebné energii v atomu a liší se v závislosti na sféře, ve které se elektron vyskytuje, na stupni zaplnění a postavení atomu v periodické tabulce prvků. Vysokou ionizační energii vykazují atomy vzácných plynů, protože mají plně obsazené valenční elektronové vrstvy.

Po odtržení nejslaběji vázaného elektronu může postupně docházet k odtržení ostatních elektronů. K odtržení každého dalšího elektronu z elektronového obalu je zapotřebí stále více ionizační energie, neboť narůstá i vazebná energie, kterou jsou elektrony poutány k atomovému jádru. Pokud zbavíme atom veškerých elektronů, vznikne plazma tvořené pouze elektrony a atomovými jádry. Takovéto plazma nazýváme vysokoteplotní a nachází se např. v jádře našeho Slunce.

Na obr. č. 2 je zobrazen průběh různých stupňů ionizace plynného kyslíku podle Sahovy rovnice (6). Zatímco pro odtržení prvního elektronu je zapotřebí ionizační energie 13,6 eV, k odtržení šestého elektronu je to už 138 eV. Poslední dvě ionizace (7. a 8.) už nejsou na grafu vykresleny. Ke zbavení atomu kyslíku všech osmi elektronů je zapotřebí ionizační energie 870 eV, což odpovídá teplotě asi 260 000 K.

U počátečních ionizací kyslíku nedochází k překrývání průběhů (např. první ionizace končí při teplotě 5 500 K a druhá začíná až při teplotě 8 000 K). Znamená to, že až v objemu plynu dojde k dokončení první ionizace (všechny atomy nebo molekuly jsou zbaveny jednoho elektronu), nastává druhá ionizace. Jinak řečeno, nenajdeme v plazmatu různé kladné ionty, které by se lišily počtem odtržených elektronů. To ovšem neplatí u plazmatu s velkými teplotními rozdíly. Takovým plazmatem je např. el. oblouk, kde se teplota na povrchu a v ose

oblouku značně liší. Na povrchu oblouku tak může probíhat první ionizace, zatímco v ose oblouku např. třetí.



Obr. č. 2 – Závislost stupně ionizace na teplotě pro různé ionizační potenciály
plynného kyslíku (O_2)

K ionizaci může docházet různými mechanismy:

- ionizace srážkou neutrálního atomu s elektronem
- ionizace srážkou s iontem nebo neutrálním atomem
- ionizace přeměnou (tzv. fotoionizace) – srážka neutrálního atomu s fotonem
- kumulativní ionizace (několik srážek v řadě za sebou, jejichž jednotlivá energie je příliš nízká k ionizaci, ale v součtu k ionizaci neutrálního atomu vede)
- termická ionizace (tepelná ionizace – vytrhávání elektronů z pevné fáze hmoty, např. ze žhavené katody)

Rekombinace

Kromě ionizačních pochodů dochází v plynu také k zániku nabitých částic za vzniku částic neutrálních. Tento proces označujeme jako rekombinaci. Podle mechanismu rekombinace rozlišujeme tři druhy rekombinačních pochodů:

- rekombinace dvou iontů za vzniku neutrální molekuly a vyzáření energie



- rekombinace dvou iontů za vzniku dvou neutrálních excitovaných atomů



- rekombinace dvou iontů s účastí třetí (chemicky inertní částice) za vzniku neutrální molekuly a odvedení uvolněné energie třetí částicí



kde M je inertní částice (např. atom netečného plynu)

První dva procesy se uplatňují zejména při velmi nízkých tlacích. Rekombinační procesy se týkají jak kladných a záporných iontů, tak i elektronů s kladnými ionty.

2.2 Sahova rovnice

V ionizovaném plynu dochází v každém okamžiku jak k ionizačním, tak také k rekombinačním pochodům. Pokud je počet ionizovaných atomů za jednotku času roven počtu neutralizovaných atomů, hovoříme o ustáleném stavu. Plyn, který ionizujeme termickou ionizací, představuje termicky rovnovážný stav, na který můžeme aplikovat termodynamické zákony a odvodit tak Sahovu rovnici (6).

Stupeň ionizace plynu x můžeme definovat jako:

$$x = \frac{n_e}{n_e + n_0} = \frac{n_i}{n_e + n_0} = \frac{n_e}{n_g} = \frac{n_i}{n_g} \quad (-) \quad (5)$$

kde n_g je počáteční hustota částic neutrálního plynu,

n_i je hustota iontů,

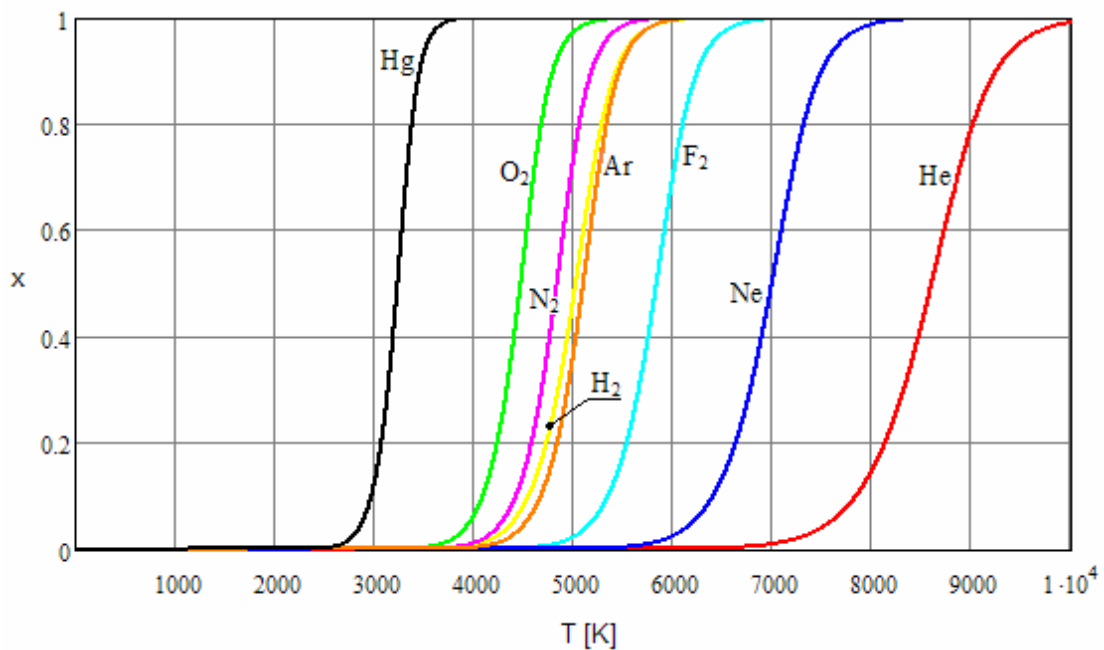
n_e je hustota elektronů,

n_0 je hustota neutrálních atomů.

Sahova rovnice má pak tvar

$$\frac{x^2}{1-x^2} \cdot p = \frac{(2\pi \cdot m)^{\frac{3}{2}}}{h^3} \cdot (k \cdot T)^{\frac{5}{2}} \cdot e^{\frac{-e \cdot U_i}{k \cdot T}} \quad (6)$$

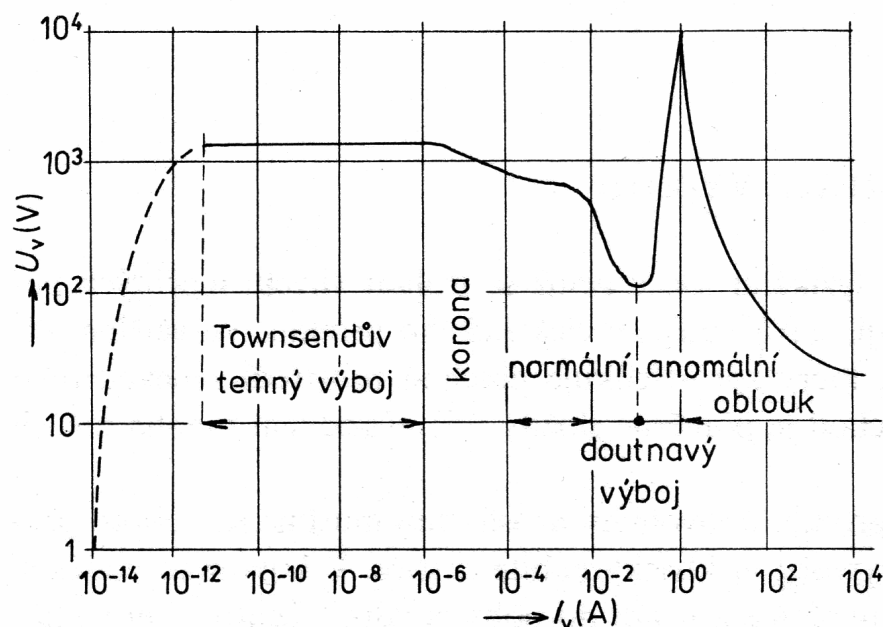
Grafická interpretace Sahovy rovnice je pak na obr. č. 3. Je-li $x = 1$, pak jsou všechny částice v plynu již zionizovány. Jsou zde vykresleny průběhy prvního stupně ionizace pro různé plyny v závislosti na teplotě. Z vybraných plynů lze nejjednodušší ionizovat plynnou rtuť (ionizace začíná při 2 500 K a při 4 000 K jsou již všechny částice zionizované), nejobtížnější pak (ze zvolených plynů) hélium – všechny atomy jsou zionizovány až za hranicí 10 000 K. Je to dáno velkou hodnotou prvního ionizačního potenciálu helia ($U_{1(\text{He})} = 25 \text{ eV}$). [5]



Obr. č. 3 – Závislost stupně ionizace na teplotě pro různé plyny (jejich první ionizační potenciál)

3. Elektrický oblouk

El. výboje můžeme rozdělit podle doby trvání na výboje přechodné a ustálené. Ustálené výboje můžeme dále rozdělit na výboje samostatné a nesamostatné. Samostatné výboje nepotřebují pro svou existenci zdroj volných nosičů náboje, protože si je tvoří samy a jsou tak schopny samostatné existence. Nesamostatné výboje naproti tomu potřebují buď zdroj nosičů elektřiny, příp. zdroj energie, který je schopen ionizovat částice v mezielektrodovém prostoru. Rozdělení el. výbojů podle proudu, který jimi protéká a napětí, při nichž existují, je na obr. č. 4.



Obr. č. 4 – Voltampérová charakteristika stacionárních výbojů

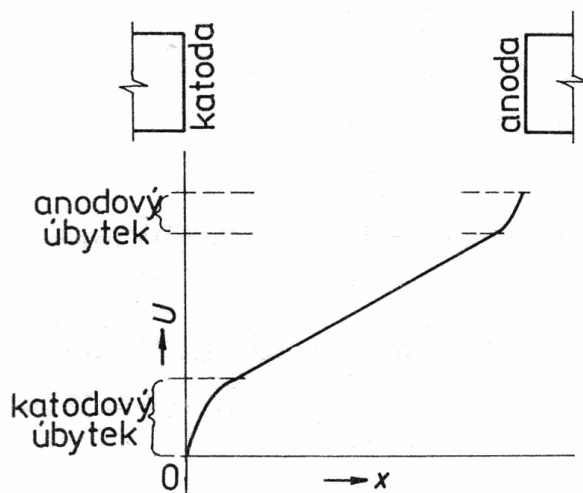
Townsendův temný výboj patří mezi výboje nesamostatné. Ke své existenci potřebuje nejen zdroj energie, ale i zdroj volných nosičů náboje. Dalším druhem výboje je koróna, která vzniká při dostatečně velkém napětí na kovových hrotech a hranách (tedy tam, kde se vyskytuje značně nehomogenní el. pole). U doutnavého výboje hrají hlavní úlohu prostorové náboje. Vzniká jen při tlacích nižších, než je tlak atmosférický. Praktické využití nachází např. u neonových trubíc pro reklamní účely. Další fází je výboj jiskrový, který se uplatňuje např. při jiskrovém obrábění. Specifickou jiskrou je rovněž v přírodě běžně se vyskytující blesk.

Posledním a nejznámějším výbojem je el. oblouk, který nachází své uplatnění v širokém spektru technických aplikací.

El. oblouk je samostatný el. výboj v plynu nebo v páře schopný existovat libovolně dlouhou dobu s těmito znaky:

- vysoká teplota katodové skvrny nebo celé katody, která postačuje k tepelné emisi elektronů
- velká proudová hustota na katodě
- malý katodový a anodový úbytek
- malý celkový úbytek napětí na těle oblouku
- velký proud protékající proudovou dráhou
- intenzivní vyzařování v celém spektru

El. oblouk má v obvodu ryze činný charakter a jeho vlastnosti závisí na charakteristice výboje. Odpor oblouku není ve výbojové dráze rozložen rovnoměrně, vyšších hodnot dosahuje u elektrod, kde se projevuje vyšším úbytkem napětí (obr. č. 5). Úbytek na elektrodách závisí na materiálu, z něhož jsou vyrobeny, dále na jejich tvaru, na proudu procházejícím obloukem a fyzikálních a chemických vlastnostech prostředí, ve kterém hoří. [3]



Obr. č. 5 – Průběh úbytku napětí na oblouku

3.1 Katodové jevy

Podle elementárních procesů, které se odehrávají na katodě, rozlišujeme dva případy:

- katoda emituje elektrony, které zajišťují vedení proudu
- katoda neemituje elektrony, proud je v katodové oblasti zajišťován pouze kladnými ionty, které postupují z okolního plazmatu

Podle existence či neexistence katodové skvrny a jejího chování dělíme oblouky do tří skupin:

- a) el. oblouk bez katodové skvrny

Sem patří oblouky hořící v obvodu s katodou, která je vyrobena z těžkovitých kovů. Katodové jevy zde probíhají termo-elektrickou emisí.

- b) el. oblouk s katodovou skvrnou

K těmto obloukům patří vysokotlaké oblouky s tlakem vyšším, než je tlak atmosférický. Katoda je vyrobena z wolframu, el. oblouk hoří v inertních plynech při velmi vysoké proudové hustotě. Proud se u tohoto typu oblouku přenáší kladnými ionty, které dodává plazma koncentrované blízko u povrchu katody. Při snížení procházejícího proudu u oblouku bez katodové skvrny dojde k přechodu k oblouku s katodovou skvrnou a naopak.

- c) el. oblouk se studenou katodou

Zde patří oblouky s kovovými katodami o nízkém bodu varu (např. měď). Katodová skvrna se zde pohybuje velmi rychle po celém povrchu katody, a to až už chaoticky nebo organizovaně.

Katodový spád v obloucích s wolframovou katodou a měděnou anodou při použití argonu nebo dusíku a prouděch 50 až 200 A je asi 7 (± 2) V. Uvedené uspořádání se používá u většiny plazmových hořáků, které pracují s nezávislým obloukem. [5]

3.2 Anodové jevy

V oblasti anody vznikají kladné ionty, které jsou el. polem urychlovány přes sloupec plazmatu až ke katodě. Energie usměrněného pohybu iontů přechází v energii tepelného pohybu.

Kovové anody, které se používají v el. obloukových pecích, neemitují kladné ionty. Proto je přenos proudu v blízkosti anody realizován pouze elektrony a vzniká zde záporný prostorový náboj. Tím, že tento náboj není nijak kompenzován, dochází ke vzniku anodového spádu potenciálu.

V obloucích s malým proudem a s anodou z kovů nebo jejich kysličníků se anodový spád pohybuje v rozmezí 3 až 12 V. Se zvětšováním spádu a růstem proudu se obvykle anodový spád zmenšuje. Tyto jevy se spojují s přechodem od ionizace elektrony urychlenými polem k termické ionizaci. Při zvětšování proudu z 50 na 200 A klesá anodový spád v obloucích s wolframovou katodou a měděnou, vodou chlazenou anodou, hořící v dusíku, lineárně ze 17 na 2 V. Anodový spád v argonovém oblouku závisí i na teplotě plazmatu a hustotě proudu na anodě.

Podle vnějších příznaků se někdy oblouky s kovovou anodou dělí na oblouky se zúženým sloupcem u anody a oblouky bez zúžení sloupce u anody. Zúžená skvrna pak vzniká v okysličujících plynech. Anodová skvrna se po povrchu anody často přemísťuje. V některých případech při poměrně velké hustotě proudu unikají z anody páry.

V obloucích hořících v dusíku nebo v inertních plynech dochází ke zúžení sloupce u anody pouze při malých proudech. Hustota proudu přitom dosahuje hodnot řádu $10^6 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$. Při proudech nad 30 A se zúžení sloupce nevyskytuje. V dusíkových obloucích leží proudová hustota na anodě v rozmezí $(5 \text{ až } 6) \cdot 10^6 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$, v argonovém oblouku se hustota proudu na anodě mění v závislosti na proudu a délce oblouku od $2 \cdot 10^6$ do $10^7 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$.

Při rozboru energetické bilance v oblasti anodového spádu potenciálu je nutno si všimnout elektronů urychlovaných ve směru k anodě i iontů, které vznikají při elektronové nebo termické ionizaci a pohybují se ve směru od anody ke sloupci oblouku. Kinetická energie, kterou náboje získávají při urychlování, se spotřebuje na kompenzaci ztrát, která je v této oblasti v porovnání s radiálními ztrátami sloupce oblouku vyšší. Pohyblivost elektronů je mnohonásobně větší než pohyblivost iontů a na každých 1000 elektronů dopadajících na anodu, připadá pouze 1 iont vzniklý v anodové oblasti. Následkem toho energie spotřebovaná na ionizaci má v energetické bilanci této oblasti oblouku pouze malý vliv. K anodě je výkon přiváděn proudem elektronů, zářením a vedením díky tepelné vodivosti plazmatu el. oblouku. Tento výkon se spotřebuje na tepelné vedení do mnohem studenějších částí anody, na tepelné záření a u některých typů oblouků i na vypařování materiálu z anody. [5]

3.3 Sloupec elektrického oblouku

Úbytek napětí na těle oblouku je v porovnání s úbytkem na elektrodách relativně malý. Závisí především na proudu protékajícím el. obloukem, druhu a tlaku prostředí, v němž hoří, materiálu a tvaru elektrod, příp. jejich znečištění či korozi a chlazení oblouku.

S rostoucím el. proudem, procházejícím obloukem, se zvyšuje jeho teplota. Vzrůst teploty způsobí zvýšení el. vodivosti plazmatu, což se projeví snížením napětí na oblouku.

Úbytek napětí na volně hořícím oblouku závisí na elektrické vodivosti plazmatu, která souvisí s teplotou plazmatu. Teplo se zde přenáší hlavně vedením a úzce souvisí s velikostí průřezu oblouku. Pokud zvýšíme hodnotu proudu procházejícího el. obloukem, dojde zároveň ke zvětšení průřezu oblouku. Pokud bude průřez příliš velký, sníží se teplota plazmatu, v důsledku toho i el. vodivost a napětí vzroste. Naopak pokud bude průřez příliš malý, zvýší se teplota plazmatu a z důvodu malého průřezu bude napětí opět velké. Mezi těmito dvěma extrémními případy existuje optimální stav, kdy je napětí minimální. El. oblouk se tedy nastaví do stavu minimálního napětí, kdy bude jeho energetická bilance nejvýhodnější. Tuto skutečnost můžeme vyjádřit vztahy (7) a (8).

$$\frac{dE}{dT} = 0 \quad (7)$$

$$\frac{dE}{dr} = 0 \quad (8)$$

Napětí na oblouku ovlivňuje rovněž druh plynu, ve kterém oblouk hoří. Inertní plyny nevytvářejí molekuly, a proto je k jejich ionizaci potřeba méně energie než v případě víceatomových plynů. Důvodem je skutečnost, že víceatomové plyny nejprve disociují a až poté dochází k samotné ionizaci.

Dalším činitelem ovlivňujícím úbytek napětí jsou tepelné ztráty způsobené tepelnou vodivostí plazmatu. Teplo se šíří od středu oblouku k jeho povrchu pouze vedením. Na povrchu dochází k ochlazení oblouku i zářením a prouděním.

Úbytek napětí je ovlivněn i množstvím odpařeného materiálu elektrod. Už malé množství materiálu může zásadně ovlivnit charakter el. oblouku.

Při umělém chlazení oblouku dojde k ochlazení jeho vnějších vrstev, což způsobí zmenšení jeho průřezu, zvýšení el. odporu v ose oblouku a vzrůst teploty. Proto je teplota v jádru uměle chlazeného oblouku vyšší než u oblouku volně hořícího. [5]

3.4 Statická charakteristika elektrického oblouku

Statická charakteristika popisuje závislost obloukového napětí na proudu, který prochází el. obloukem, v obvodu napájeným stejnosměrným zdrojem napětí. Skládá se ze dvou částí. První část je klesající, její tvar je hyperbolický a týká se malých proudů. Druhá část je pak stoupající, tvarem se blíží přímce a platí pro větší proudy procházející el. obloukem. V určité oblasti mezi malými a velkými proudy dochází k neklidnému hoření oblouku a oblouk vydává typický syčivý zvuk. V této oblasti způsobuje procházející proud odpařování materiálu, ze kterého je vyrobena anoda. V oblasti klidného hoření oblouku platí empirický vztah, který odvodila Ayrtonová (9). Grafické znázornění je na obr. č. 6.

$$U_{ob} = A + B \cdot l + \frac{C + D \cdot l}{I} \quad (9)$$

kde U_{ob} je napětí na oblouku (V)

I je proud procházející obloukem (A)

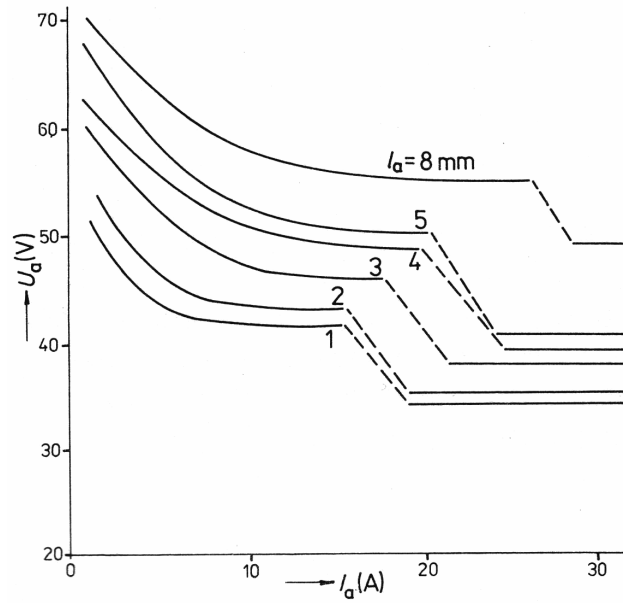
l je délka oblouku (m)

A je úbytek napětí na elektrodách, který závisí na materiálu a tvaru elektrod (V)

B je úbytek napětí na trupu oblouku, který závisí na prostředí, ve kterém oblouk hoří (V . m⁻¹)

C je výkon potřebný k přechodu proudu z katody do oblouku a z oblouku do anody (V . A)

D je výkonová ztráta na těle oblouku (V . A . m⁻¹)



Obr. č. 6 – Statické charakteristiky el. oblouku podle Ayrttonové

Charakteristiky na obr. č. 6 platí pro oblouk hořící mezi uhlíkovými elektrodami ve vzduchu, jehož délka je jen několik milimetrů. Později byl tento vztah upraven Nottinghamem do tvaru (10).

$$U_{ob} = A + B \cdot l + \frac{C + D \cdot l}{I^n} \quad (10)$$

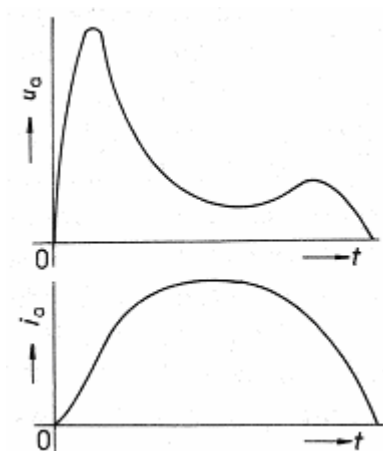
kde n nabývá hodnot podle materiálu anody od 0,35 pro zinek do 1,38 pro wolfram.

Např. pro uhlíkové elektrody jen $n = 1$ a pro měděné elektrody pokryté oxidy je $n = 0,67$. U dostatečně dlouhých oblouků je možné zanedbat konstanty A a C a rovnici (9) zjednodušit. Navíc při velkých proudech protékajících el. obloukem lze zanedbat i zlomek D/I . Rovnice přejde do tvaru (11). V praxi toto zjednodušení postačuje pro odhad napětí na oblouku, který vzniká při vypínání zkratového proudu. [2] [3]

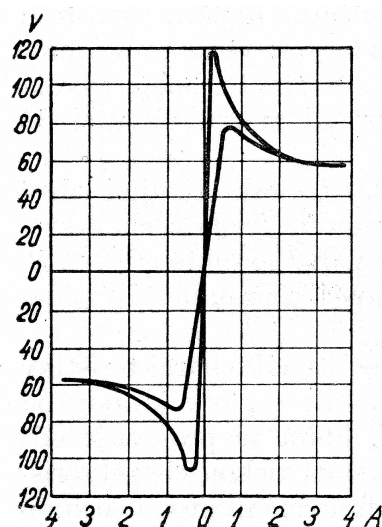
$$U_{ob} = B \cdot l \quad (11)$$

3.5 Dynamická charakteristika elektrického oblouku

Je důležitá u oblouků napájených střídavým proudem. Střídavý oblouk totiž při každém průchodu proudu nulou uhasíná a při změně polarity elektrod, kdy se z anody stává katoda a naopak, znovu zapaluje. Katoda emituje elektrony ihned na počátku nové půlperiody, protože je už zahřátá z předchozí půlperiody. Tepelná setrvačnost umožňuje znovuzapálení el. oblouku, které nastává po překročení průrazného napětí prostoru mezi elektrodami. Na obr. č. 7 je průběh napětí a proudu střídavého oblouku a na obr. č. 8 je pak dynamická charakteristika.



Obr. č. 7 – Průběh napětí a proudu
u střídavého oblouku



Obr. č. 8 – Dynamická charakteristika
el. oblouku

Nepatrné zvýšení proudu na počátku půlperiody (obr. č. 8) naznačuje, že elektrony jsou z katody emitovány ještě před zapálením oblouku. Na tvar dynamické charakteristiky má vliv především materiál elektrod, délka oblouku, odporový předřadník a frekvence napájecího napětí. Zvětšující délka oblouku posouvá charakteristiku k vyšším napětím. Zvětšuje se i její plocha a dojde ke zvýšení zapalovací špičky. Předřadník také snižuje velikost zapalovací špičky a navíc se charakteristika posouvá do oblasti menších proudů. Rostoucí frekvence také snižuje zapalovací špičku a charakteristika získává tvar přímky. [3]

3.6 Elektrická jiskra

Aby došlo k samotnému zapálení el. oblouku, musí nejprve vzniknout jiskra. Jiskra je nejstarší známý příklad uměle vyvolaných el. výbojů. Vzniká z koróny, když napětí na elektrodách překročí průrazné napětí. Vnější vzhledem se podobá krátkou dobu trvajícím el. oblouku. Je tvořena několika výbojovými kanály, které mají poměrně malý průřez a vyzařují velmi intenzivní světlo. Všechny výbojové kanály vycházející z jedné elektrody nemusí končit na druhé elektrodě, ale mohou končit ve vzduchu. Přeskok jiskry je doprovázen poměrně velkým hlukem.

Jiskru zařazujeme do samostatných výbojů, i když její časové trvání je velmi krátké. Ve většině případů nepotřebuje jiskra vnější zdroj, který by ionizačními pochody vytvářel el. náboje ve výbojové dráze.

Doba vytvoření jiskry se měří od okamžiku přiložení napětí, které postačuje pro zapálení jiskry. Tato doba je ve většině případů velmi krátká a můžeme ji rozdělit na dvě části: na zpoždění zapalovacího procesu (tzv. doba předzápalu) a vlastní dobu vytváření jiskry. Zpožděním zapalovacího procesu nazýváme dobu, ve které se po připojení napětí na elektrody nezačne vytvářet jiskra. Je to doba, za kterou vznikne v prostoru mezi elektrodami první el. náboj nutný pro vznik výboje. Zpoždění zapalovacího procesu je statistickou veličinou a závisí jednak na pravděpodobnosti výskytu náboje ve výbojové dráze, a jednak na pravděpodobnosti vzniku ionizačního pochodu vytvářející el. náboje.

Střední doba zpoždění zapalovacího procesu závisí na několika faktorech. Nejdůležitější z nich jsou intenzita ionizujícího záření a velikost přiváděného napětí, které musí být větší než zapalovací napětí jiskry. O vlivu ionizujícího záření se můžeme přesvědčit odstíněním veškerého záření dostatečně tlustým olověným obalem. Při dokonalém odstínění je doba zpoždění zapalovacího procesu v některých případech rovna hodině.

Dobu zpoždění můžeme snížit ozařováním jiskřiště ultrafialovým nebo rentgenovým zářením. Ozařením s dostatečnou intenzitou může být doba zpoždění snížena na nulu. Doba vytvoření plazmatu jiskry je řádově 10^{-8} s. Za tuto dobu musí být plyn ve výbojové dráze zahřátý na velkou teplotu. Další podmínkou vzniku jiskry je velký vnitřní odpor zdroje, při malém vnitřním odporu zdroje vznikne oblouk.

Jiskru tedy můžeme z předchozího popisu definovat jako nestabilní a nespojitý samostatný výboj v plynu vznikající při atmosférickém nebo vyšším tlaku a při poměrně velkém napětí na elektrodách. Voltampérová charakteristika jiskry má klesající průběh, stejně jako V-A charakteristika el. oblouku. Jiskru tedy můžeme pokládat za velmi intenzivní oblouk s velmi krátkou dobou trvání. [4]

4. Plazmové hořáky

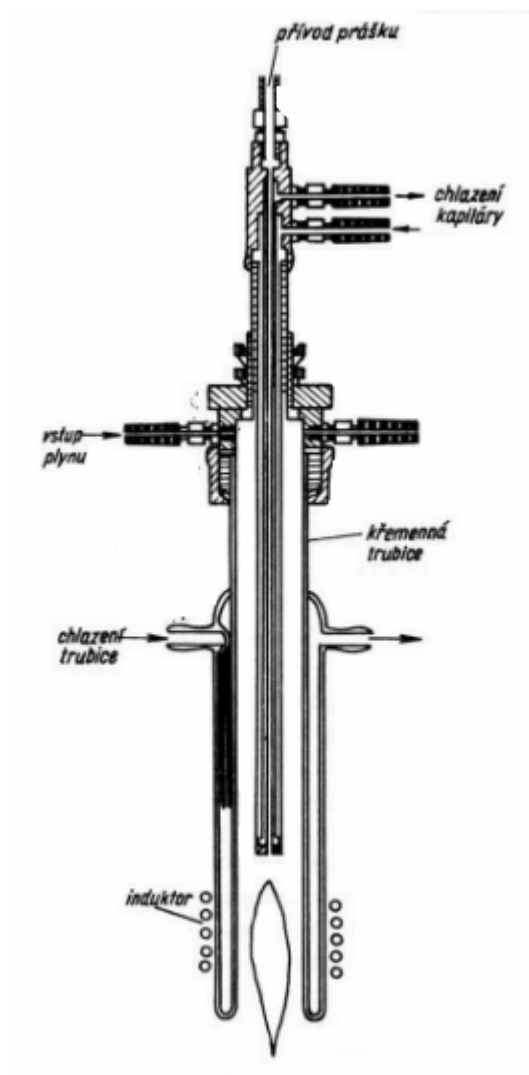
Plazmové hořáky (generátory) se v metalurgii používají jako zdroje nízkoteplotního plazmatu. Mezi jejich výhody patří zejména:

- umožňují provádět hutnické pochody za podstatně vyšších teplot než je tomu u jiných zdrojů tepla
- snadná a přesná regulace teplot
- přesné řízení směru toku tepelné energie
- možnost používání nejen čistých inertních atmosfér, ale i jiných aktivních atmosfér o požadovaném složení

4.1 Vysokofrekvenční plazmové hořáky

Využívají přeměnu VF energie frekvence jednotek až desítek MHz. Jejich výhodou je možnost práce s jakoukoliv atmosférou, protože při své činnosti nevyužívají žádné elektrody. Absence elektrod zaručuje, že při tavení nedojde ke znečištění použitého plazmotvorného plynu ani zpracovávaného materiálu erozí elektrod. Nevýhodou jsou malé výkony a nízká účinnost, které omezují použití tohoto typu plazmového generátoru pouze pro laboratorní výzkumy. Zařízení je schématicky znázorněno na obr. č. 9. Křemenná trubka s mosazným víkem, která slouží pro přívod plynu, je ve vertikální poloze a její funkcí je pouze vedení plynu. Asi v 1/3 spodní otevřené části trubky je na vnější straně umístěna vysokofrekvenční cívka, která je tvořena několika závity z měděné trubky. Cívkou protéká chladicí médium (voda). Při startu se do pracovního prostoru cívky zavede ionizovaný plyn. Dostatečné počáteční ionizace se dosáhne zasunutím uhlíkové nebo wolframové tyče (umístěné ve víku) do prostoru obklopeného cívkou. Tyč se vysokofrekvenčním proudem zahřeje a vznikne termická emise. Elektrony urychlené ve vysokofrekvenčním poli ionizují plyn. Po rozšíření ionizované oblasti je elektroda vytažena z pracovního prostoru. Spuštění hořáku se provádí čistým argonem a dodatečně se přimíchávají jiné plyny. Stabilita plazmatu je dobrá při malých rychlostech podávaného plynu. Při vyšší rychlosti, kdy se nestačí přiváděný plyn zahřát plazmatem na ionizační teplotu (a do té doby nemůže vzniknout indukční vazba), plazma zanikne. Tangenciálním podáváním plynu lze zvýšit celkové množství vytékajícího plazmatu, protože ve střední, nejteplejší části, vzniká axiální pohyb plazmatu v opačném směru následkem sání, které je způsobeno vírem.

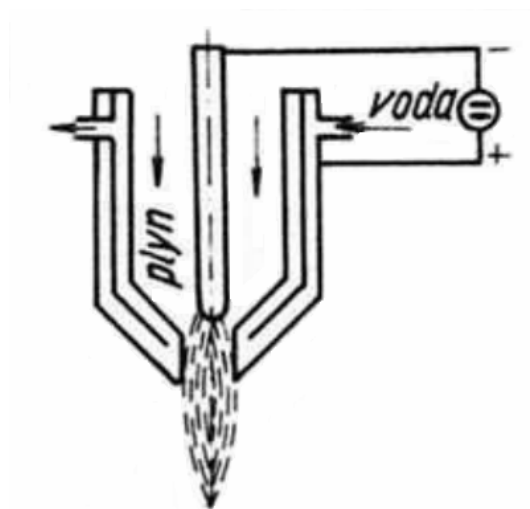
Nejvyšší teplota, které se dosahuje v plazmatu bez ohřevu nějakého předmětu, je závislá na druhu plynu. U čistého dusíku se dosahuje v jádře teploty kolem 18 000 K, u argonu je to zhruba 15 000 K. [2] [5]



Obr. č. 9 – Schéma vf. plazmového generátoru

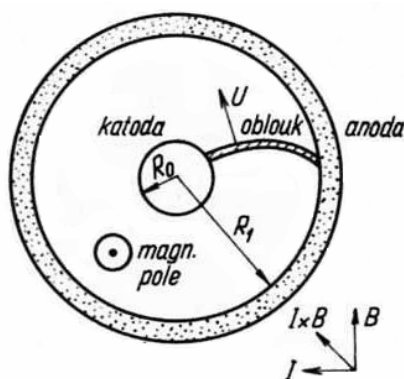
4.2 Plazmové hořáky s nezávislým elektrickým obloukem

Používají se tehdy, pokud není možné uzavřít el. obvod mezi ohřívaným materiálem a katodou plazmového hořáku (zpracování el. nevodivých materiálů) nebo tehdy, pokud je to z technologického hlediska výhodnější. Schéma tohoto typu je na obr. č. 10.



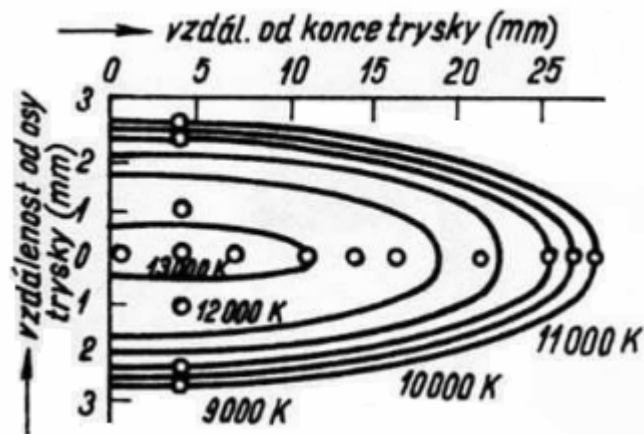
Obr. č. 10 – Schéma plazmového hořáku s nezávislým obloukem

Anoda je tvořena tryskou, která má vhodnou geometrii a která je intenzivně chlazena vodou. Odvod tepla stěnou trysky je malý, protože horké plazma je od ní izolováno vrstvou plynu, který má malou tepelnou vodivost. Pokud použijeme vodík jako plazmotvorný plyn, můžeme dosáhnout účinnosti kolem 80 %. Nevýhoda tohoto typu hořáku spočívá v tom, že tryska (anoda) je vysoce tepelně namáhána a při použití vodíku dochází k dalšímu přivádění tepelné energie na anodu. Proto se používá magneticky otáčených oblouků (obr. č. 11). Na el. oblouk, kterým prochází el. proud I a je v magnetickém poli o intenzitě B , působí síla F . Při své rotaci dosáhne oblouk takové rychlosti, při které se aerodynamický odpor dostane do rovnováhy s působící elektromagnetickou silou.



Obr. č. 11 – El. oblouk v axiálním magnetickém poli plazmového hořáku

Anodová skvrna oblouku rozděluje pochody v kanálu trysky na dvě charakteristické oblasti. V první části (oblast od katody až po aktivní anodovou skvrnu) se hromadí tepelná energie vlivem zvětšení množství disociovaného a ionizovaného plynu. V důsledku velké rychlosti plynu a vlastního elektromagnetického pole je oblouk v této části zúžen. Za aktivní skvrnou (druhá část) se tepelný obsah energie již zmenšuje. Dochází zde k neutralizaci ionizovaných částic a k rekombinaci atomů na molekuly, při které se uvolňuje tepelná energie. Délka této oblasti závisí na rychlosti proudění plynu a na rychlosti rekombinačních pochodů. Dochází zde k vyrovnávání teploty plynu, protože zde již neexistují elektromagnetické síly. Proto je zde dříve zúžený proud plazmatu rozšířen a zaplňuje větší část průřezu trysky. Rozdělení teplot v plameni plazmatu je naznačeno na obr. č. 12.



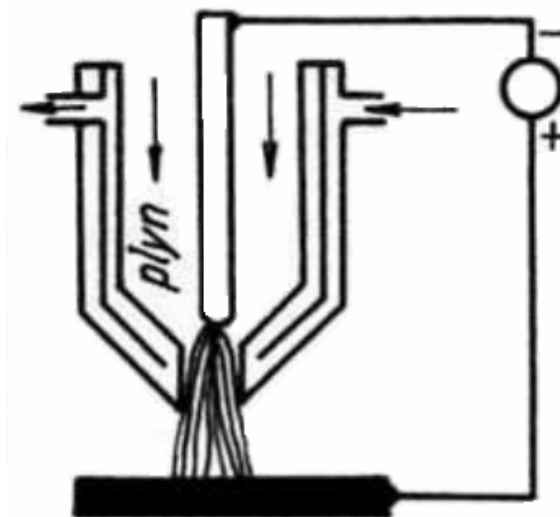
Obr. č. 12 – Rozložení teplot hořáku pracujícího s nezávislým el. obloukem

Se snižováním spotřeby plazmotvorného plynu se mění výtok plazmatu z turbulentního na laminární. Ten se vyznačuje velmi jasným ostřím a délkou plamene několik desítek centimetrů.

Teplota vytékajícího plazmatu závisí především na příkonu plazmového hořáku. Se zvyšováním příkonu narůstá střední teplota plamene. Tato závislost však není v důsledku nárůstu ztrát způsobených rostoucí tepelnou vodivostí a zářením plazmatu lineární. Zvýšení výkonu je vhodnější provést zvýšením napětí než proudu. Nárůst proudu má totiž za následek zvětšování eroze elektrod. [5]

4.3 Plazmové hořáky se závislým elektrickým obloukem

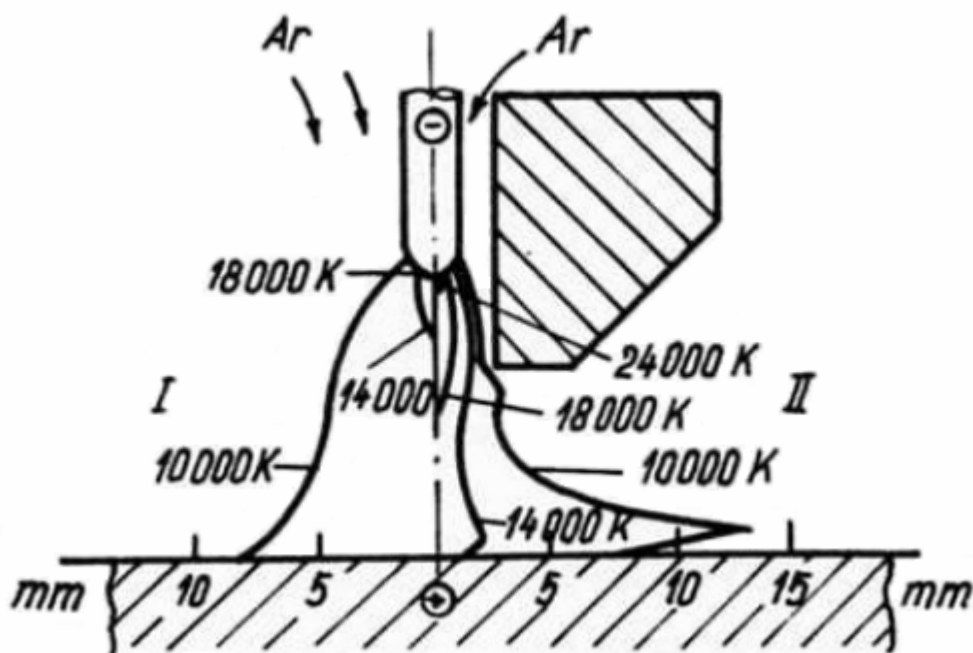
Nejpoužívanějším zapojením plazmových hořáků pro tavení kovů, zejména pak větších výkonů, je zapojení se závislým el. obloukem (obr. č. 13). Anodou je v tomto případě přímo el. vodivý materiál vsázky. Z toho vyplývá, že toto zapojení nelze použít pro zpracování nevodivých materiálů.



Obr. č. 13 - Schéma plazmového hořáku se závislým obloukem

Při optimálním návrhu průměru trysky a správném proudění plazmotvorného plynu v prostoru mezi katodou a anodou je celý průřez trysky symetricky vyplněn. Seškrcení průměru el. oblouku pomocí trysky má jednak stabilizační účinek, a jednak vede k vysoké koncentraci tepelné energie. Účinnost plazmového hořáku v zapojení se závislým obloukem závisí zejména na geometrickém uspořádání katody a trysky a dále také na způsobu proudění plazmotvorného plynu kolem hořícího oblouku. Při zapojení podle obr. č. 13 se zhruba 75 % tepelné energie předává vsázce el. obloukem a zbývajících 25 % pak proudem plazmatu.

Vliv zúžení oblouku pomocí trysky na rozdělení teplot ve sloupci plazmatu a rozdíl mezi seškrceným a volně hořícím obloukem je na obr. č. 14. Už poměrně malé seškrcení oblouku – průměr trysky je 4,75 mm – způsobí nárůst teploty oblouku o 30 % a nárůst napětí na dvojnásobek. Seškrcení výrazně zvyšuje hustotu proudu a koncentraci energie.



Obr. č. 14 – Rozdělení teplot ve volném a seškrceném oblouku

Při použití závislého oblouku není sloupec plazmatu stejnorodý. Nejvyšší teploty a nejvyššího stupně ionizace se dosahuje v úzké části v ose oblouku. Tato část má také nejvyšší el. vodivost a uzavírá hlavní proudový okruh. Na povrchu sloupce plazmatu teplota, el. vodivost i stupeň ionizace výrazně klesají a přibližují se tak podmínkám okolního prostředí. Teplota seškrceného oblouku dosahuje zhruba 16 000 K, což je až 3krát více než teplota volně hořícího oblouku.

U plazmových hořáků pracujících se závislým obloukem hraje důležitou roli hodnota napěťového spádu U_i ve vnitřní části trysky. V této oblasti dochází ke stabilizaci, tvarování a vymezení průměru sloupce plazmatu kanálem trysky. Důsledkem je intenzivní předávání tepelné energie stěně trysky. Aby nedošlo ke zničení trysky, používají se pro její výrobu materiály s vysokou tepelnou vodivostí a teplo je z povrchu trysky odváděno intenzivním chlazením. Protože však materiály, které mají vysokou tepelnou vodivost, mají i vysokou el. vodivost, hrozí nebezpečí vzniku druhého oblouku (mezi katodou a tryskou, která je izolována od hlavního vodivého kanálu pouze tenkou vrstvou studeného plynu). Jednou z podmínek vzniku druhého (nežádoucího) oblouku je nerovnost:

$$U_t < U_t^a + U_t^k \quad (\text{V}) \quad (12)$$

kde U_t^a je anodový spád potenciálu oblouku pro materiál trysky (většinou měď) (V)

U_t^k je katodový spád potenciálu oblouku pro materiál trysky (V) [5]

4.4 Kombinované elektrické zapojení plazmových hořáků

V plazmové metalurgii se běžně využívá kombinace nezávislého a závislého oblouku. Nezávislý oblouk se pak většinou využívá jen při startu, tedy pro ionizaci prostoru mezi katodou a vsázkou. Tímto pomocným obloukem obvykle prochází 5 – 25 A, což plně postačuje pro ionizaci prostoru. Po uzavření el. okruhu mezi katodou a taveným materiálem je pak zdroj, který napájel nezávislý oblouk, odpojen. V praxi se využívá pouze jediného zdroje stejnosměrného proudu. Ten je připojen na katodu a zpracovávaný kovový materiál a odbočka z kladné větve zdroje je připojena k trysce přes odpor, který snižuje velikost proudu na pomocném oblouku. [5]

5. Plazmová rekrystalizační pec

5.1 Popis plazmové rekrystalizační pece

Plazmová rekrystalizační pec, nacházející se na půdě VŠB – TU Ostrava, patří mezi pece s kovovým horizontálním krystalizátorem, který je chlazen vodou. Používá se zejména pro přetavovací pochody, při nichž se v kovech snižuje obsah příměsí nebo se naopak tyto kovy legují např. dusíkem. Při legování kovu je hlavním problémem dodržení chemické homogenity v celém přetavovaném vzorku. Malé laboratorní pece umožňují tento nedostatek odstranit volbou vhodného krystalizátoru. Ten pak dovoluje použití vsázky, která nemá tak velké nároky na úpravu ani na její celkovou homogenitu. Na obr. č. 15 je celkový pohled na plazmovou pec a na obr. č. 16 je pohled do vnitřní pracovní části pece.



Obr. č. 15 – Pohled na plazmovou rekrystalizační pec



Obr. č. 16 – Pohled do vnitřní pracovní komory pece

Tato pec umožňuje přetavování výchozího materiálu o hmotnosti do 1 kg, a to jak v kusové, tak v práškové podobě. Využívá se zde principu pásmového tavení. Zdrojem tepelné energie je plazmový hořák (plazmový generátor, plazmatron). Vsázka se přetavuje v měděném krystalizátoru tvaru žlabu (obr. č. 17), který je intenzivně chlazen vodou a který umožňuje výrobu homogenních slitin nejrůznějších kovů, jejichž bod tání nepřesahuje 3400 °C. Podélný posuv krystalizátoru lze regulovat v rozsahu 2 až 2000 cm · h⁻¹.



Obr. č. 17 – Ukázka měděných krystalizátorů

Velmi nízká rychlost, kterou plazma opouští trysku plazmatronu, spolu s vysokou odolností hlavních součástí proti tepelné erozi, umožňují provádět pochody pásmové rafinace s širokým rozhraním mezi kapalnou a plynnou fází přetavovaného materiálu. To zajišťuje velmi účinné oddělování kovu od nežádoucích příměsí, které jsou v něm obsaženy. Zpětným pohybem krystalizátoru a vhodnou volbou rychlosti posuvu zase můžeme docílit opačného výsledku v porovnání s pásmovou rafinací, tedy vyrovnaní koncentračního gradientu a získání tak z výchozího, nestejnoroďého materiálu, slitinu s vysokým stupněm homogenity.

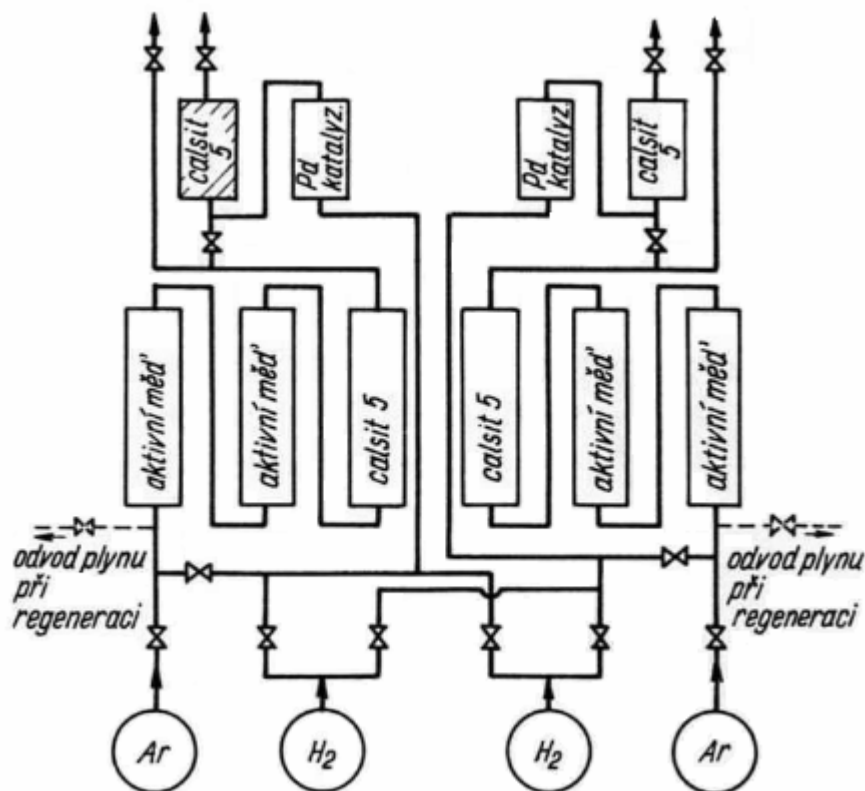
Při použití plazmového hořáku, který má trysku o průměru 16 mm, můžeme v této peci připravovat vzorky čistých kovů a slitin oválného průřezu o rozměrech: šířka 40 mm, výška 30 mm a délka až 400 mm (obr. č. 18). Tato velikost ingotů plně postačuje pro určení základních fyzikálních vlastností přetavovaných materiálů.



Obr. č. 18 – Ukázka ingotů připravených v plazmové peci

Chlazení nejvíce namáhaných součástí plazmové rekrystalizační pece a plazmatronu obstarává vodní čerpadlo, které je schopno dodávat až 120 litrů vody za minutu při tlaku 1,1 MPa. Plazmatron, coby nejvíce tepelně zatěžovaná součást, je chlazen vždy nejvyšším možným tlakem chladicího média. Co se týče chlazení měděného krystalizátoru, zde se nastavuje průtok vody podle druhu vsázky tak, aby zbytečně nedocházelo k přílišnému odvádění tepla z taveného vzorku. Na druhou stranu ale nesmí dojít k tepelnému poškození krystalizátoru nebo k difúzi mědi do přetavovaného materiálu.

Součástí pece je zařízení, které zajišťuje čištění plazmotvorných plynů (obr. č. 19). Plyn se nejprve čistí od nežádoucích příměsí a poté se přivádí přes plazmový hořák do prostoru pece. Pec je vybavena cirkulačním zařízením, které použitý plyn odvádí z pecního prostoru a opět čistí, aby mohl být znovu využit. Novým, dosud nepoužitým plynem pak jsou ztráty. V případě použití agresivního plynu (např. argonu), který by mohl poškodit součásti pece či plazmatronu, se cirkulace neprovádí, použitý plyn se odvádí jako odpadní a přivádí se jen čistý argon. Nejnižší hodnota průtočného množství argonu plazmatronem se pohybuje okolo 20 litrů za minutu.



Obr. č. 19 – Schéma cirkulačního zařízení pro čištění plazmotvorných plynů

Vysoké homogenity se dosahuje při přetavování dokonalým promísením roztavené vsázky, které probíhá zejména v oblasti roztavené zóny především díky regulovatelnému tlaku sloupce plazmatu. Pomocí něj lze vytvořit v taveném materiálu prohlubeň a dokonale protavit vsázku až ke stěnám vodou chlazeného krystalizátoru.

Nevýhodou této pece, a tedy důvodem, proč se tento typ používá jen jako laboratorní zařízení, je nízká účinnost přenosu tepla na přetavovaný materiál. Pohybuje se okolo 50 %. Naopak výhodou jsou velmi nízké ztráty kovů během tavby, které umožňují přetavování a přípravu slitin vzácných kovů (např. zlata, platiny, stříbra aj.). Dalším kladem při přípravě slitin je téměř 100 % zachování výchozího složení vsázky, které je dáno možností výroby katody ze stejného materiálu jako je materiál výchozí vsázky. To umožňuje výrobu slitin metalurgicky velmi odlišných kovů, jako např. tantal v kombinaci s titanem a hliníkem i dalších prvků. [5] [7]

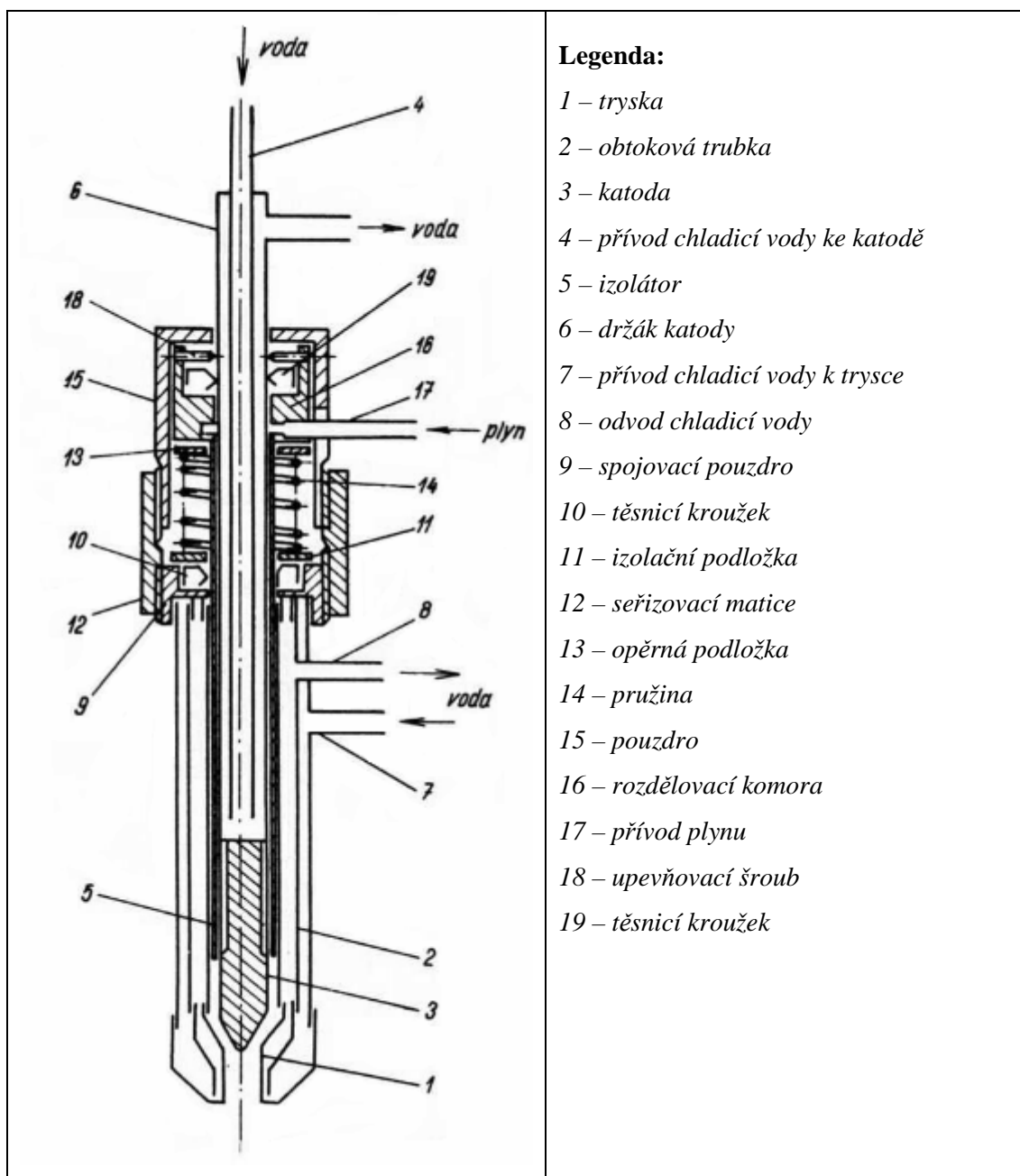
5.2 Popis plazmového hořáku

Vývojářem i konstruktérem tohoto plazmového hořáku je Vladimír Dembovský. Během pracovního cyklu je možno regulovat nejen velikost proudu, ale i průtočné množství a složení plazmotvorného plynu a získávat jak turbulentní, tak i laminární výtok plazmatu z ústí trysky. Pohled na plazmový hořák je na obr. č. 20. Principiální schéma je pak na obr. č. 21.

Konstrukce je řešena tak, aby bylo možné dosáhnout nejvhodnějších aerodynamických poměrů při výtoku plazmatu z ústí trysky. Zároveň je možno ještě před započetím tavby nastavit optimální geometrické faktory, které ovlivňují charakter el. oblouku v mezelektrodovém prostoru. [5] [7]



Obr. č. 20 – Skutečné provedení plazmového hořáku

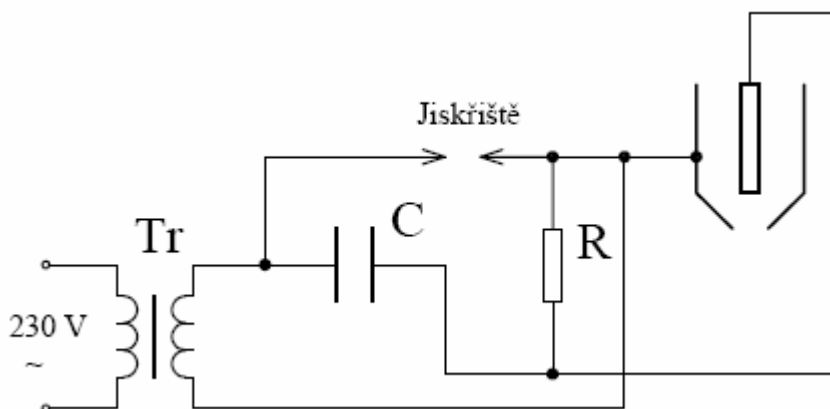


Obr. č. 21 – Principiální schéma plazmového hořáku

5.3 Inicie oblouku

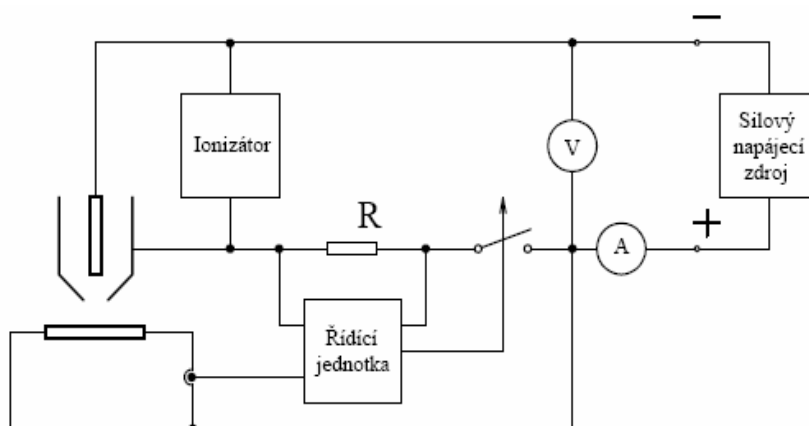
Konstrukce plazmového hořáku umožňovala zapálení oblouku mechanickou cestou bez ionizátoru. Stlačením horní části posuvné katody se obě elektrody spojily, tím se zapálil el. oblouk a následně vrátil pružinový systém katodu zpět do pracovní polohy.

V současné době probíhá iniciace oblouku pomocí ionizátoru (obr. č. 22). Součástí ionizátoru je vysokonapěťový transformátor, který je svým primárním vinutím připojen na síťové napětí 230 V. Sekundární vinutí je připojeno na vysokonapěťový kondenzátor C. Ke kondenzátoru je paralelně přes odpor R připojeno jiskřiště. Výstupy z ionizátoru jsou připojeny na katodu a trysku plazmového hořáku (pomocnou anodu).



Obr. č. 22 – Ionizátor sloužící k iniciaci el. oblouku

Při iniciaci oblouku je tryska plazmatronu (pomocná anoda) připojena ke kladnému potenciálu zdroje a tvoří spolu se vsázkou anodu. Ionizátor je zapojen mezi katodu a trysku plazmatronu a při iniciaci oblouku generuje vysokonapěťové impulsy, které způsobí zapálení el. oblouku. Vzniklý oblouk hoří v první fázi v prostoru mezi katodou a tryskou plazmatronu a až pak je pomocí plazmotvorného plynu vyfouknut do komory pece, čímž se uzavře hlavní okruh a plazmatronem začne protékat pracovní proud. Proudové čidlo, které se nachází na přívodním kabelu k plazmatronu, zareaguje na protékající pracovní proud a odpojí ionizátor. Základní schéma zapojení napájení plazmatronu je na obr č. 23.



Obr. č. 23 – Schéma připojení plazmatronu k ionizátoru a napájecímu zdroji

Příkon pece (plazmatronu) je možné měnit na základě údajů z voltmetru a ampérmetru, které jsou přímo součástí pultu pece. V současné době je pec navíc doplněna elektronickým měřením napětí a proudu, které usnadňuje pracovníkovi obsluhy regulaci výkonu při tavbě. Vizuální kontrolu průběhu tavby umožňuje průhled na peci, díky němuž může pracovník na základě svých zkušeností dále regulovat výkon hořáku. Stejnoseměrný napájecí zdroj byl v minulém roce nahrazen novým. U starého zdroje nebylo možné provádět regulaci spojitě z jednoho místa v celém rozsahu, ale na silovém napájecím zdroji, který se nacházel v sousední místnosti, byl přepínač čtyř proudových rozsahů (tab. č. 1). V každém jednotlivém rozsahu pak již bylo možné přímo z pracoviště obsluhy provádět spojitou regulaci. Současný zdroj má pouze dva rozsahy, mezi kterými je potřeba přepínat přímo na ovládání zdroje, a to 0 – 600 A a 600 – 1200 A. V obou intervalech je už pak možné regulaci provádět přímo z místa obsluhy pece. [7]

Tab. č. 1 – Přepínatelné proudové rozsahy starého napájecího zdroje plazmové pece

	<i>Možnost spojitě regulace v proudovém rozsahu:</i>
Stupeň I	100 – 520 A
Stupeň II	500 – 750 A
Stupeň III	730 – 900 A
Stupeň IV	880 – 1000 A



Obr. č. 24 – Pohled na silové napájecí zdroje – vlevo starý zdroj, vpravo současný

6. Elektrostatika plazmatronu

Pole statické je pole, ve kterém jsou náboje v klidu, a proto proudy jsou nulové, vektory pole jsou v čase konstantní a derivace podle času nulové. Maxwellovy rovnice se rozpadnou na dvě nezávislé soustavy tak, jak se pole jevílo fyzikům do konce 18. století.

$$\text{a) } \operatorname{rot} \vec{E} = 0, \quad \operatorname{div} \vec{D} = \rho, \quad \vec{D} = \varepsilon \cdot \vec{E} \quad (13)$$

kde \vec{E} je vektor intenzity el. pole ($\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$)

\vec{D} je vektor el. indukce ($\text{C} \cdot \text{m}^{-2}$)

ρ je objemová hustota el. náboje ($\text{C} \cdot \text{m}^{-3}$)

ε je permitivita (součin permitivity vakua ε_0 a relativní permitivity ε_r) ($\text{F} \cdot \text{m}^{-1}$)

$$\text{b) } \operatorname{rot} \vec{H} = 0, \quad \operatorname{div} \vec{B} = 0, \quad \vec{B} = \mu \cdot \vec{H} \quad (14)$$

kde \vec{H} je vektor intenzity magnetického pole ($\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$)

\vec{B} je vektor magnetické indukce (T)

μ je permeabilita (součin permeability vakua μ_0 a relativní permeability μ_r) ($\text{H} \cdot \text{m}^{-1}$)

Soustava a) popisuje pole elektrostatické, jehož zdrojem jsou náboje. Soustava b) popisuje pole magnetostatické, které nemá zdroj typu volných proudů a popisuje tak pole permanentních magnetů.

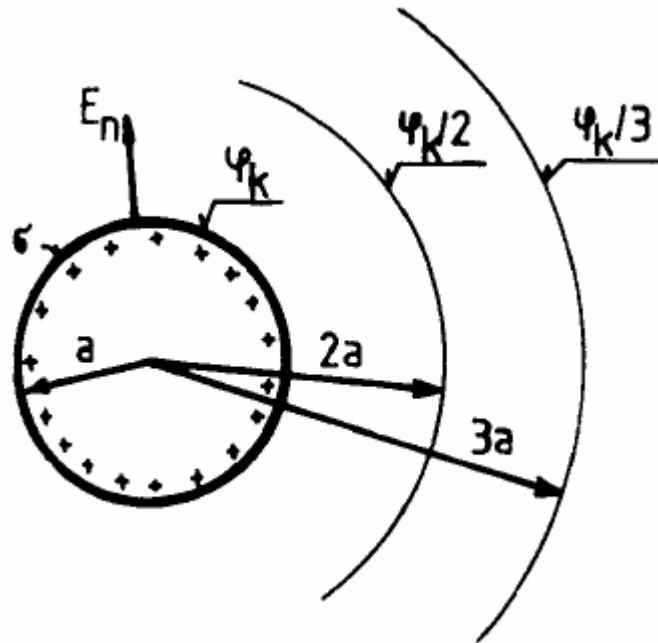
Elektrostatika se zabývá poli, ve kterých je elektrický náboj v klidu. Takové zjednodušení lze použít pro řadu technických problémů. Patří sem například výpočet namáhání izolace elektrických zařízení, návrh elektrostatických vychylovacích soustav v elektronice, výpočet kapacity různě uspořádaných elektrod apod. [6]

6.1 Pole nabité koule

Mějme vodivou kouli podle obr. č. 25, která je nabitá nábojem Q_k na potenciál φ_k . Protože povrch koule je ekvipotenciála, můžeme kouli ztotožnit s ekvipotenciálou o poloměru a pole bodového náboje Q . Pro intenzitu el. pole na povrchu platí vztah:

$$E_n = \frac{Q_k}{4\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot a^2} = \frac{\varphi_k}{a} \quad (\text{V} \cdot \text{m}^{-1}) \quad (15)$$

Intenzita pole je tedy při konstantním potenciálu tím větší, čím menší je poloměr koule. Tento poznatek lze zobecnit i pro obecný tvar elektrody tak, že intenzita na povrchu elektrody je přímo úměrná potenciálu a nepřímo úměrná poloměru křivosti. Extrémně velkých hodnot dosahuje na hranách a hrotech. [6]



Obr. č. 25 – Elektrostatické pole nabité koule

6.2 Metody řešení elektrostatických polí

6.2.1 Analytické metody řešení

Využívají základních elementárních metod, je zde potřeba znát fyzikální podstatu problému. Používají se pro výpočet jednoduchých úloh (1D a 2D), využívají symetrie a různé zjednodušující předpoklady a okrajové podmínky.

Patří k nim:

a) Přímý výpočet pole podle Coulombova zákona

$$F = \frac{1}{4\pi \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r} \cdot \frac{|Q_1| \cdot |Q_2|}{r^2} \quad (\text{N}) \quad (16)$$

Lze ji použít tam, kde známe rozložení náboje, ať prostorového, plošného, liniového nebo nábojů bodových. Tento postup je víceméně teoretický, protože příslušné vztahy předpokládají jednak znalost rozložení náboje a dále neomezené homogenní prostředí.

b) Výpočet pomocí Gaussovy věty

$$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{Q}{\epsilon_0} \quad (\text{V} \cdot \text{m}) \quad (17)$$

Používáme k přímému výpočtu polí s rovinnou, kulovou nebo válcovou symetrií. V těchto případech známe tvar ekvipotenciál, na kterých je konstantní indukce, která je rovnoběžná s vektorem plochy. Tuto metodu lze použít např. pro výpočet el. polí a kapacit vedení a koaxiálních kabelů, protože ekvipotenciály mají tvar válce neomezené délky a lze je tedy ztotožnit s povrchem vodiče.

c) Metoda zrcadlení

Princip zrcadlení lze použít při výpočtu pole náboje nebo soustavy elektrod v blízkosti vodivé roviny s nulovým potenciálem. Řešení spočívá v tom, že k existujícím nábojům zavedeme symetrické náboje opačné polarity. To umožní ztotožnění ekvipotenciální plochy s plochou vodiče. [6]

6.2.2 Numerické metody řešení

Využívají výpočetní techniku a umožňují modelovat reálná 2D a 3D pole. Společným rysem všech numerických metod je náhrada přesného řešení diferenciální nebo integrální rovnice řešením přibližným, které vyjádří hledanou funkci v konečném počtu vybraných bodů (uzlů). Pole mimo uzly nalezneme vhodnou aproximací. Každá úloha je zadána:

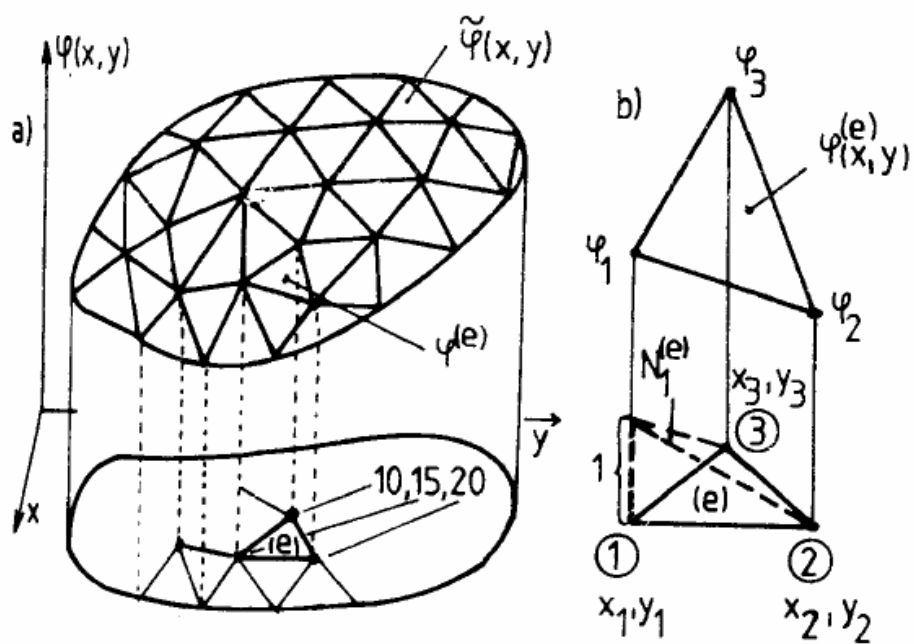
- popisem geometrie a materiálových vlastností podoblastí Ω_i , ze kterých je tvořena oblast Ω , ve které hledáme pole
- popisem okrajových podmínek na hranicích oblastí a podoblastí
- diferenciální nebo integrální rovnicí pole
- dalšími vztahy, kterými z vypočtených veličin určíme veličiny hledané (intenzitu, kapacitu, trajektorie dráhy elektronů, síly aj.)

Mezi numerické metody patří:

- metoda konečných diferencí (MKD)
- metoda hraničních prvků (MHP)
- metoda konečných prvků (MKP)

Dnes nejrozšířenější metodou je metoda konečných prvků, kterou využívá i výpočetní program ANSYS. Proto se zmíním jen o této metodě.

MKP vychází z vhodné jednoduché aproximace hledaného řešení diferenciální rovnice. Jednoduchost aproximace spočívá v tom, že oblast Ω , ve které hledáme řešení, rozdělíme na malé elementy – konečné prvky Ω^0 , definované v rozích a na hranách prvků (obr. č. 26). Potenciál uvnitř každého prvku se aproximuje z hodnot potenciálu v uzlech co nejjednodušší aproximační funkcí, a to lineárním, kvadratickým nebo binomickým polynomem. Dosazením vybrané aproximace do diferenciální rovnice nebo jí ekvivalentního výrazu vznikne zbytek, závislý na uzlových potenciálech a souřadnicích. Různými metodami minimalizace zbytku lze získat soustavy rovnic pro hledané uzlové potenciály. MKP nachází uplatnění zejména při kontrole již navržených zařízení, nebo také při hledání nejvíce namáhaného místa konstrukce (ať už elektricky, mechanicky apod.). Podrobnější informace o všech třech numerických metodách lze nalézt v [6].



Obr. č. 26 – Globální a lokální aproximace 2D úlohy

7. Příčiny neúspěšného startu plazmatronu

Jak bylo popsáno v kapitole 5.1, jedná se o plazmovou rekrystalizační pec v kombinovaném zapojení. Při startu (iniciaci oblouku) je pec zapojena jako pec s nezávislým obloukem a až po úspěšném zapálení oblouku mezi katodou a pomocnou anodou (tryskou, difúzorem) je oblouk vyfouknut plazmotvorným plynem (v našem případě argonem) do prostoru pece a dále již hoří pouze mezi katodou a vsázkou, která převeze funkci anody.

Přestože je pomocná anoda intenzivně chlazena vodou, hrozí v případě neúspěšného nebo opožděného vyfouknutí el. oblouku zničení pomocné anody (obr. č. 27). Chladicí voda pak pronikne do prostoru pece a způsobí přerušení tavby, případně i znehodnocení taveného kovu či slitiny. Obsluha pece pak musí rozebrat plazmový hořák, vyčistit vnitřek pece a vyměnit prohořelou pomocnou anodu. Protože je však tato laboratorní plazmová pec prototypem, náhradní pomocné anody nejsou běžně k zakoupení a musí se nechat vyrobit určitý počet kusů na zakázku.

Na úspěšnost zapálení a vyfouknutí el. oblouku má vliv rovněž poloha katody vůči pomocné anodě. V následující části se proto budu zabývat vlivem polohy katody na rozložení intenzity el. pole. Simulaci budu provádět ve výpočetním programu ANSYS. Ten pro řešení fyzikálních polí využívá metodu konečných prvků (kap. 6.2.2). Umožňuje simulaci nejen polí elektrických, ale také magnetických, elektromagnetických, tepelných či proudění kapalin a plynů. Dále umožňuje jednotlivá pole mezi sebou vzájemně kombinovat a postihnout tak řešený problém komplexně. Výstupem programu není jen jedna hodnota počítané fyzikální veličiny (např. intenzita elektrického pole), ale rozložení elektrostatického pole na celém modelu. To umožní získat ucelenou představu o modelu, odhalit skryté souvislosti a přistoupit k optimalizaci modelu. [8]



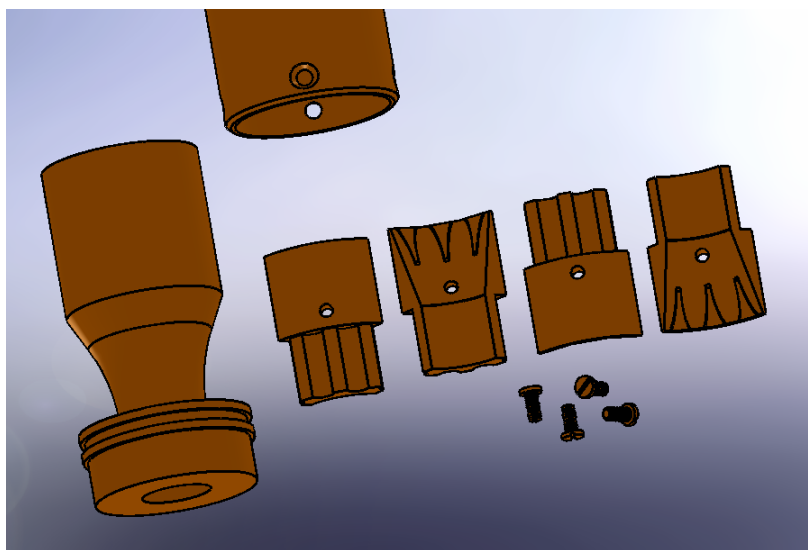
Obr. č. 27 – Pohled na propálenou trysku plazmatronu

8. Tvorba modelu plazmatronu

Pomocí posuvného měřítka jsem všechny potřebné části plazmového hořáku proměřil a vytvořil výkresovou dokumentaci v programu AutoCAD 2008. [10] Taktéž jsem v programu SolidWorks 2008 vytvořil pro názornou ukázkou 3D model plazmatronu.

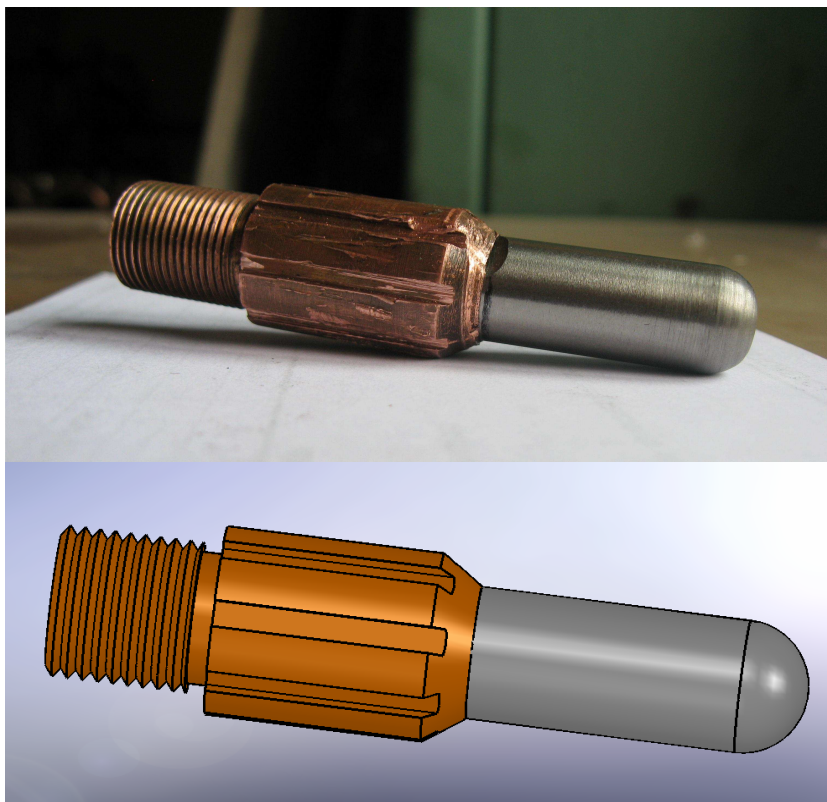


Obr. č. 28 – Jednotlivé části plazmatronu



Obr. č. 29 – Model jednotlivých částí plazmatronu vytvořený v programu SolidWorks 2008

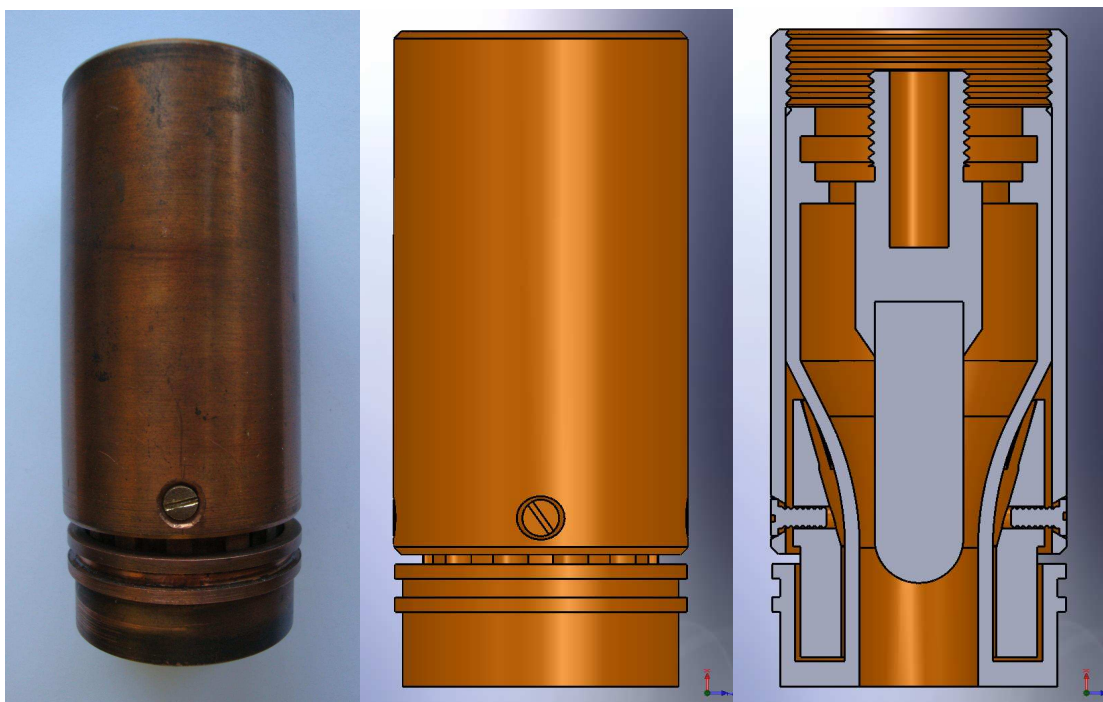
Na obr. č. 28 jsou zobrazeny jednotlivé části plazmatronu. Úplně nalevo je pomocná anoda, dále 4 segmenty, které slouží pro uchycení násady (nahore) na anodu a zároveň vymezují cestu chladicí kapalině (voda).



Obr. č. 30 – Skutečná katoda a její model v programu SolidWorks

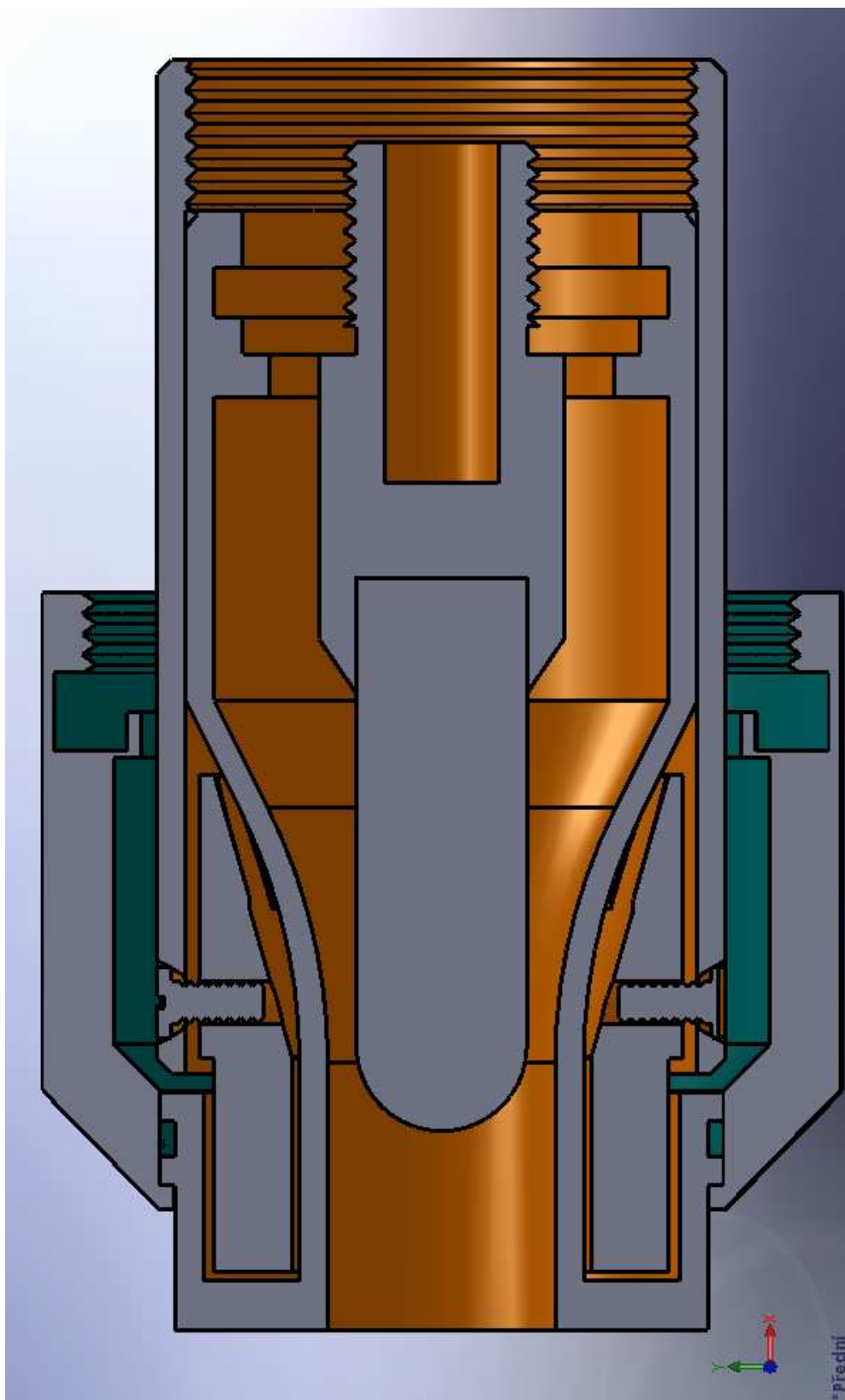
Katoda na obr. č. 30 se skládá ze dvou částí. Měděná část slouží pro našroubování na tyč, která drží katodu ve svislé poloze. Drážkami po jejím obvodu je přiváděn do plazmatronu plazmotvorný plyn (argon). Do měděné části je zapuštěn zaoblený hrot, který je vyroben z thoriovaného wolframu. Thorium přidané do wolframu zlepšuje jeho vlastnosti, elektroda snese vysoké nárazové přetížení el. proudem.

Co však působí nepříznivě při zapalování el. oblouku, je způsob zapuštění wolframové elektrody do měděné části. Ta je tam zalisována, což může způsobit její nedostatečné vystředění vůči pomocné anodě. V místě, kde je pak vzdálenost mezi anodou a katodou nejmenší, dochází k největšímu zatěžování anody a jejímu nadměrnému zahřívání.

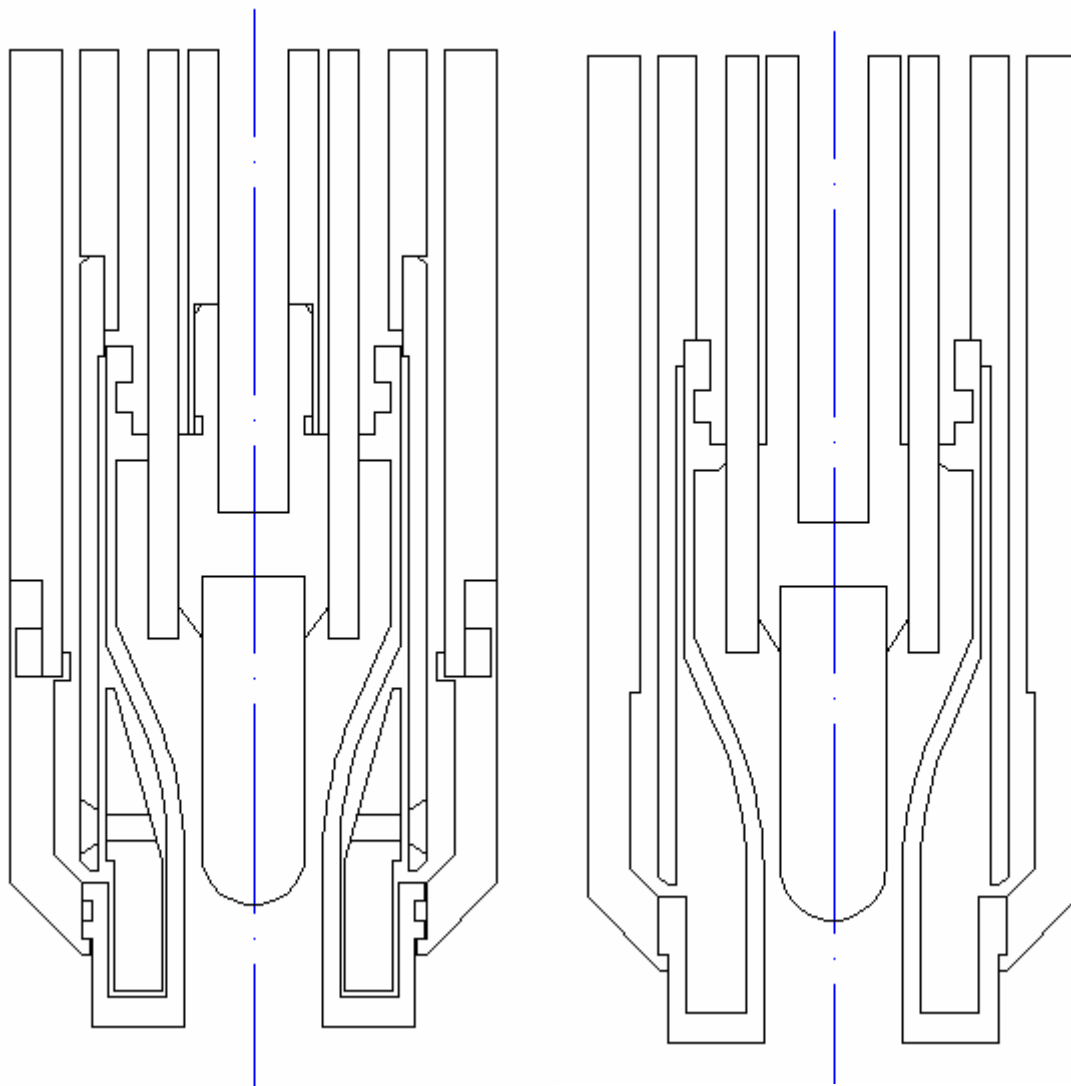


**Obr. č. 31 – Pohled na sestavený plazmatron, jeho model
v programu SolidWorks a jeho řez**

Na předchozím obrázku (obr. č. 31) je zobrazen plazmatron ve složeném stavu. Celý plazmatron je ještě nasazen do objímky, která slouží pro cirkulaci chladicí kapaliny. Voda je totiž odváděna prostorem mezi plazmatronem a objímkou. Náčr. i s objímkou je na obr. č. 32.



Obr. č. 32 – Model plazmatronu i s objímkou zajišťující cirkulaci chladicího média



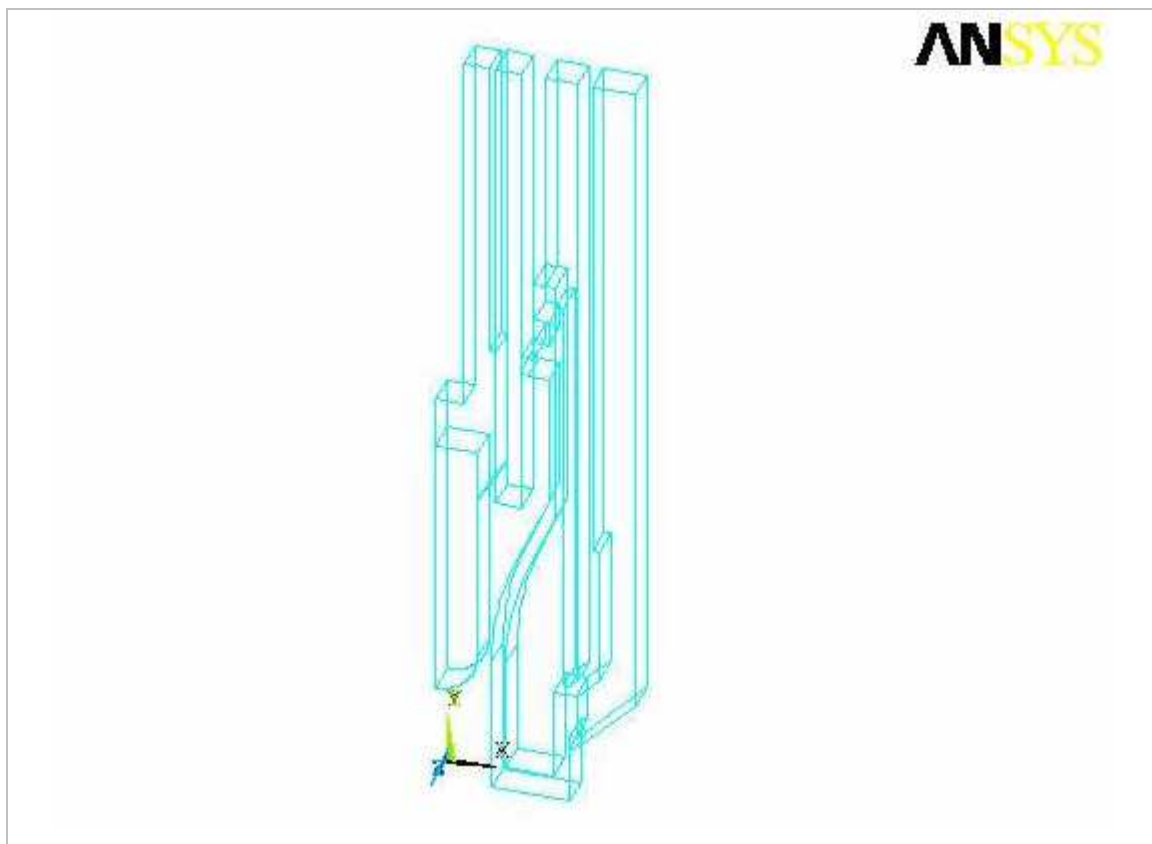
Obr. č. 33 – Sestavy jednotlivých součástí plazmatronu (program AutoCAD 2008)

Na obr. č. 33 vlevo je ukázka výkresu přesně podle skutečného uspořádání plazmatronu. Napravo je pak zjednodušený náčrt, který jsem použil pro simulaci elektrostatického pole v programu ANSYS. Ve zjednodušeném náčrtu jsem nepočítal s tolerancemi (např. pokud má být jedna součást nasazena na druhou, je zřejmé, že vnitřní rozměr první části musí být o něco menší než vnější rozměr druhé části – v náčrtu však jsou oba tyto rozměry totožné), dále jsem vypustil segmenty, jejichž nepřítomnost nijak výrazně neovlivní elektrostatické pole, spojil části, které na sebe navazují (jsou našroubovány jedna na druhou) a které jsou vyrobeny ze stejného materiálu, a konečně jsem zanedbal malé výstupky a výřezy v částech plazmatronu.

Tyto úpravy mi umožnily při zanedbatelném zkreslení výsledků podstatně zjednodušit řešení programem ANSYS. Poslední úpravou bylo oříznutí modelu podle osy Y a zmenšení modelu v poměru 1:1000. Program ANSYS totiž pracuje pouze se základními jednotkami – u délky tedy v metrech. Kdybych do něj importoval nezmenšený model, měla by např. součást o délce 10 mm délku 10 m.

Tento zjednodušený a zmenšený model jsem následně vytáhl do 3D rozměru (požadavek programu ANSYS) a exportoval do souboru s příponou SAT, se kterým už je možné v programu ANSYS pracovat.

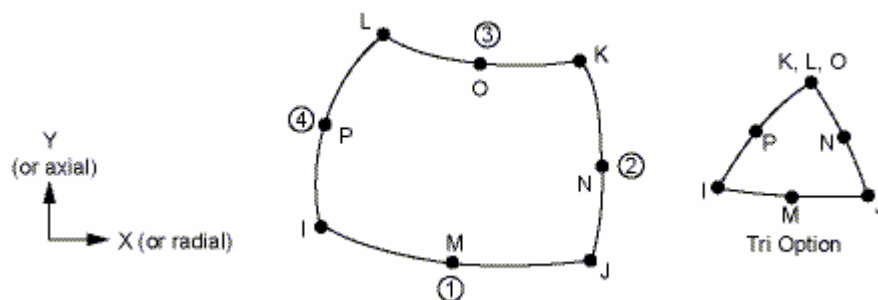
9. Analýza elektrostatických poměrů plazmatronu v programu ANSYS



Obr. č. 34 – Model plazmatronu vytvořený programem AutoCAD a importovaný do programu ANSYS

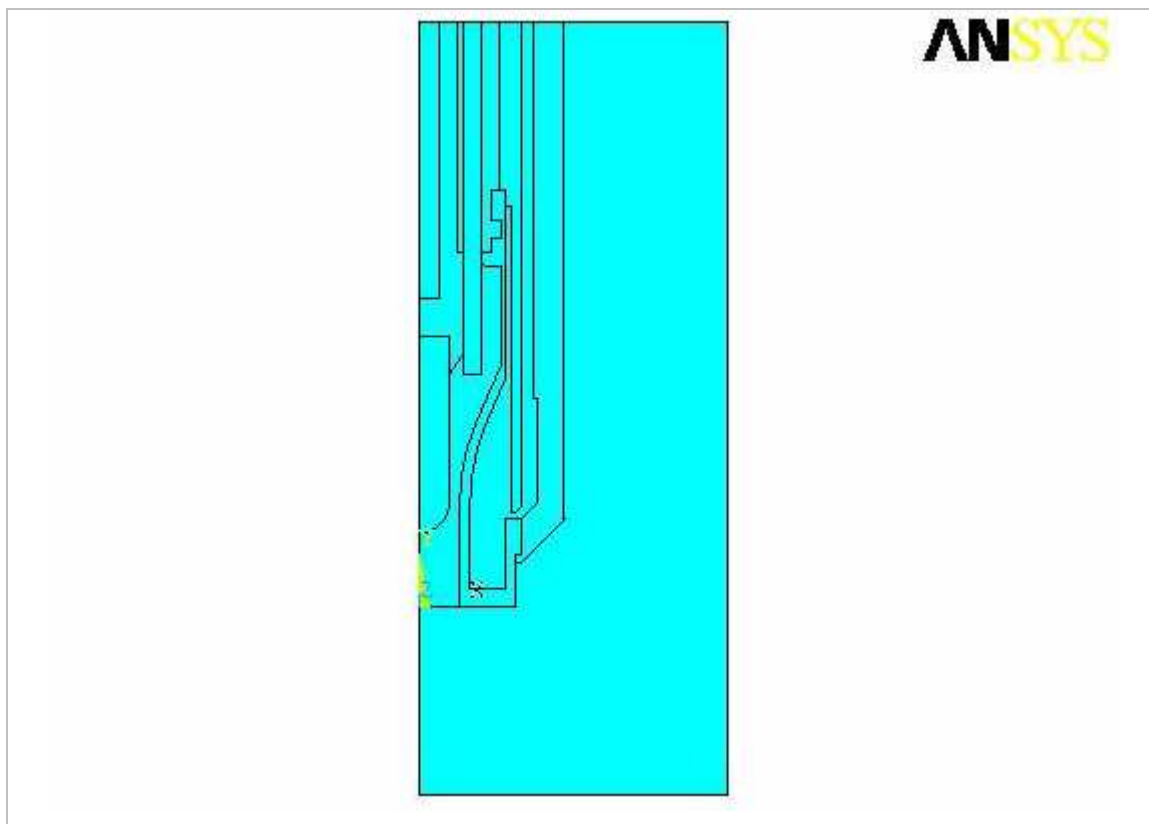
Nejprve jsem vymazal v modelu objemy a následně přebytečné plochy tak, abych 3D model zjednodušil na 2D model, který mi pro řešení tohoto typu úlohy (elektrostatika) plně postačuje. Dále jsem vytvořil vzduchové okolí modelu, bez kterého by nebylo možné simulaci provést (vzduch se nachází i uvnitř mezi katodou a pomocnou anodou).

Následně jsem definoval typ elementu, kterým budu jednotlivé plochy pokrývat. Pro tento typ úlohy se používá element PLANE 121 (obr. č. 35). Jedná se o 8-uzlový element určený k řešení 2D modelů. Je vhodný pro elektrostatickou i časově proměnnou harmonickou analýzu. Uplatnění nachází zejména tam, kde dochází k různým zakřivením geometrie modelu (např. ostré hrany a hroty, které podstatně zvyšují intenzitu elektrického pole – kap. 6.1). [9]



Obr. č. 35 – Element PLANE 121




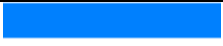

V programu ANSYS je potřeba zadat, že se jedná o úlohu axisymetrickou (osově rotační symetrie). Právě to umožnilo, že jsem mohl importovat do programu ANSYS pouze jednu polovinu řezu modelu (pravá část). Výhodou je, že při výpočtu bude automaticky zohledněno, že celý model vznikne rotací řezu kolem osy Y o 360° . Element PLANE 121 bere v potaz, že řešíme 2D model 3D plazmatronu. [8]

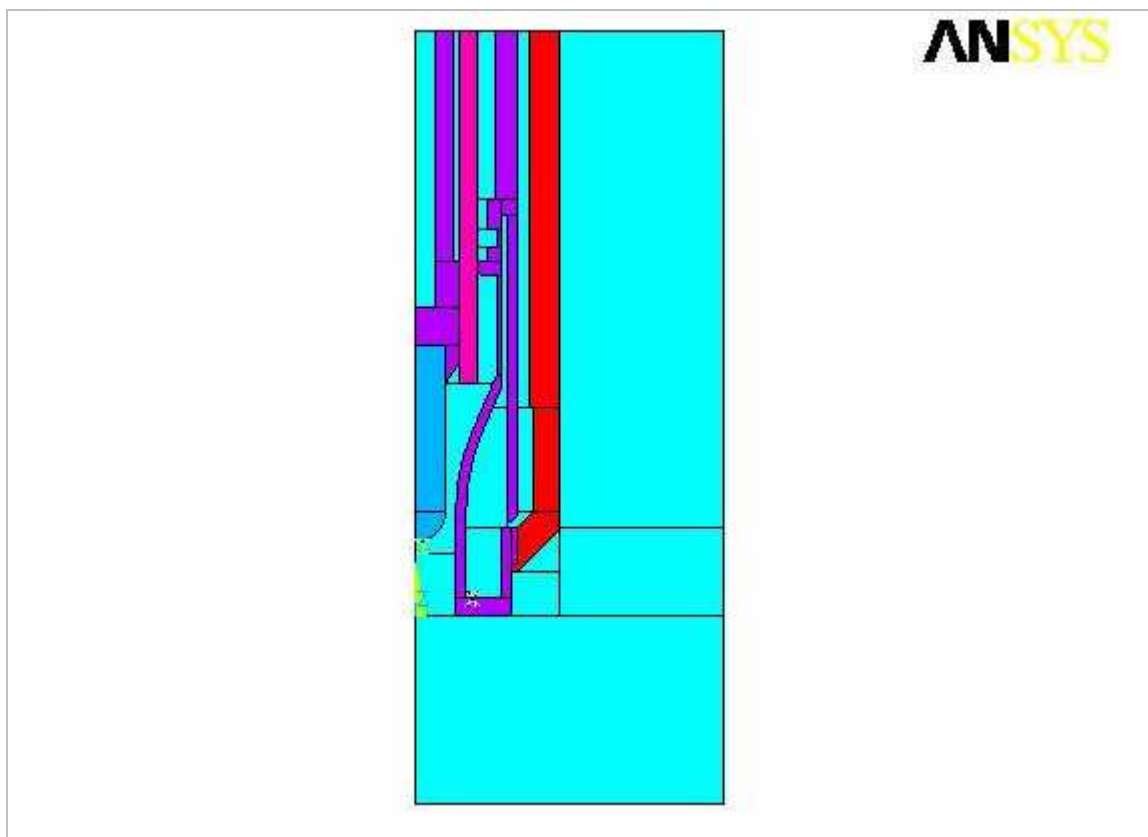


Obr. č. 36 – 2D model plazmatronu spolu se svým vzduchovým okolím

Následujícím krokem bylo rozdělení ploch modelu na menší části z důvodu jednoduššího vyplnění výpočetní sítě a nadefinování vlastností materiálů (obr. č. 37). Protože se jedná o elektrostatickou úlohu, jedinou potřebnou vlastností byla relativní permitivita ϵ_r . Ta se v souvislosti s kovovými materiály neudává v žádných tabulkách a její hodnota se považuje za nekonečně velkou.

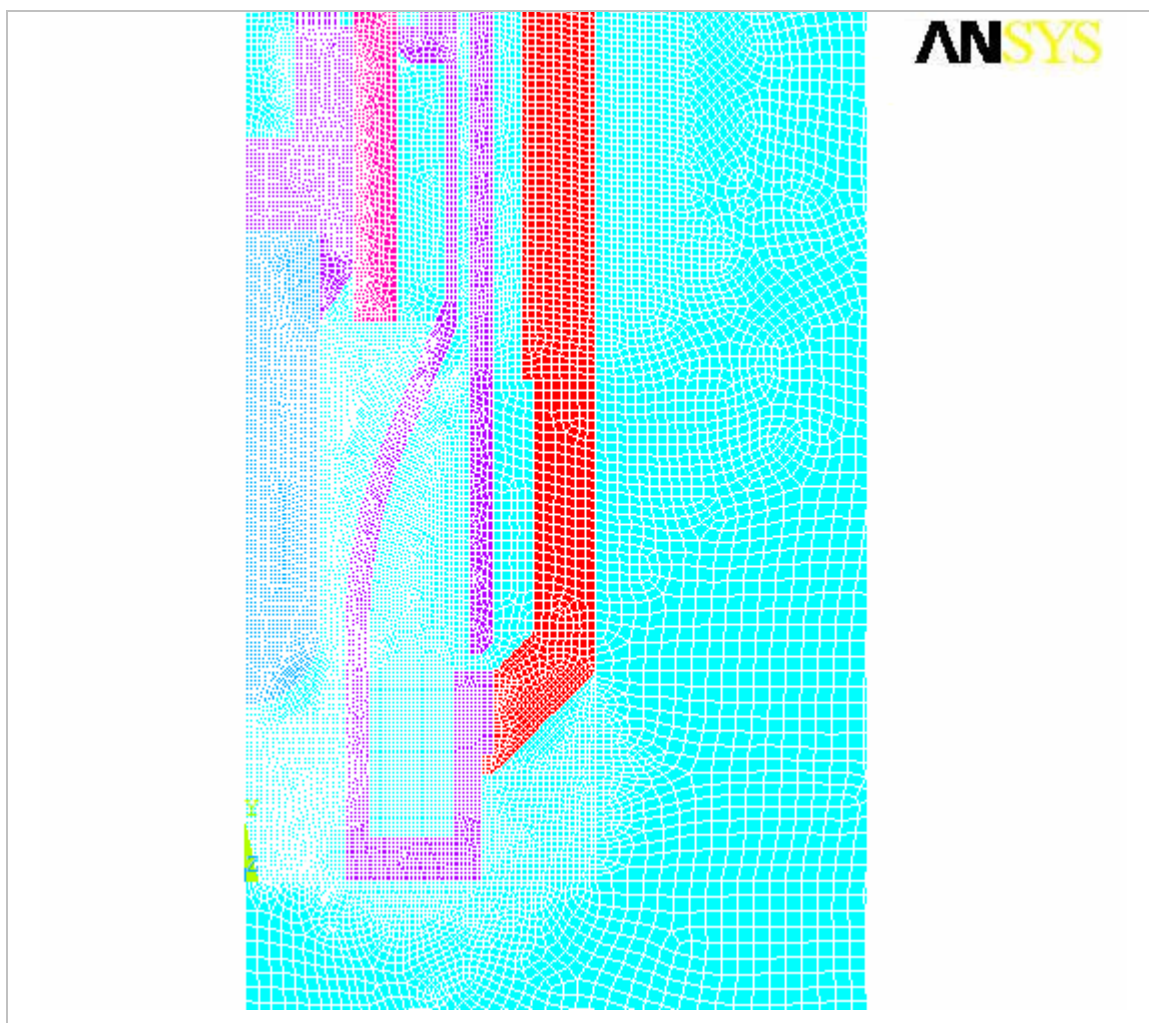
Tab. č. 2 – Definice materiálů a jejich vlastností

Číslo materiálu	Druh materiálu	Barva na obr. 36	Zadaná hodnota ϵ_r (-)
1	vzduch		1
2	měď		10^6
3	železo		10^6
4	wolfram		$2 \cdot 10^6$
5	izolant		5



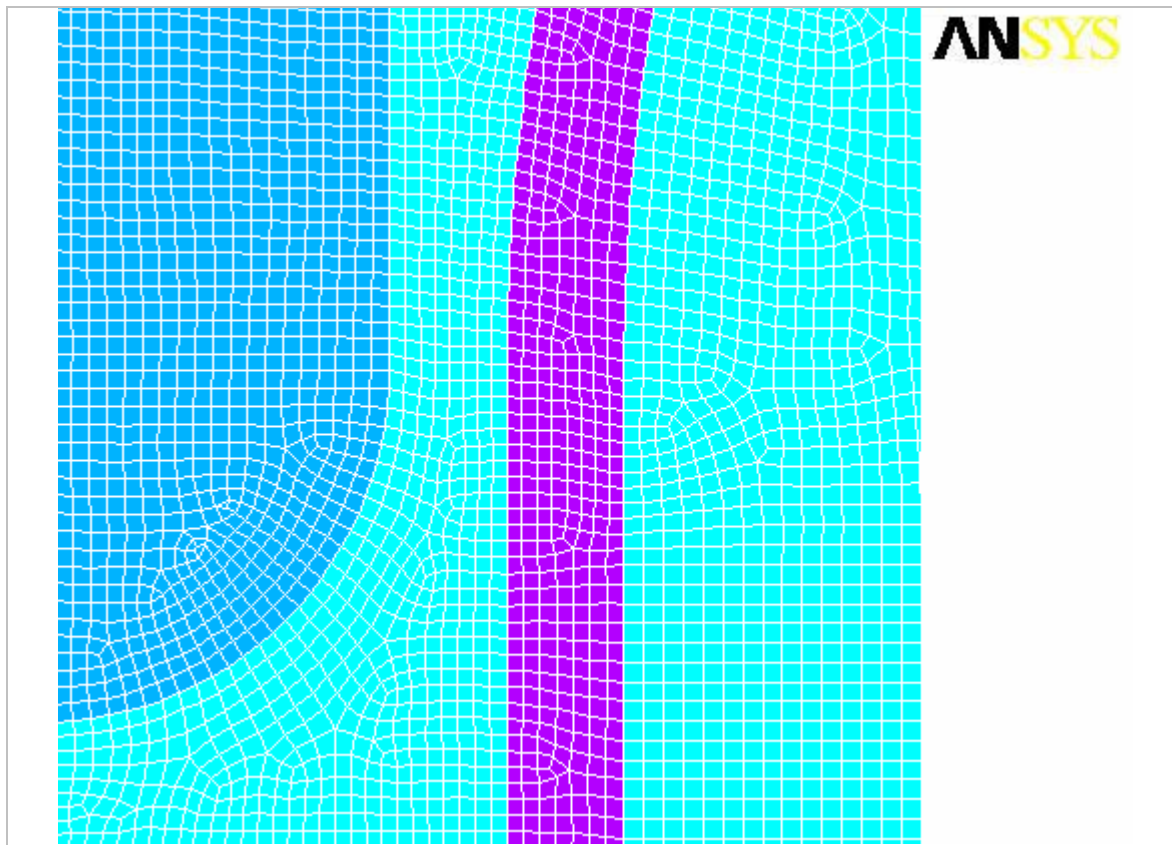
Obr. č. 37 – Přiřazení materiálů k jednotlivým plochám modelu

Nyní už zbývá jen vytvořit výpočetní síť. Čím jednodušší model máme, tím spíš bude možno použít čtvercovou (příp. obdélníkovou) síť. U méně pravidelných ploch je třeba použít síť trojúhelníkovou. Model se snažíme pokrýt takovým počtem elementů, který zaručí dostatečnou přesnost. Pokud bychom na druhou stranu použili elementů příliš mnoho, negativně by to ovlivnilo délku výpočtu pomocí PC (to platí zejména u 3D modelů, kde výpočet může trvat i několik hodin). Proto hustší síť pokrýváme místa, která nás zajímají nejvíc (oblast vzniku el. oblouku mezi katodou a pomocnou anodou) a naopak řidší síť postačuje v místech vzdálených kritickému místu (vzduchové okolí). Na obr. č. 38 je zobrazeno pokrytí výpočetní sítí celého modelu. Bílá místa jsou místa s nejvyšší hustotou sítě a tedy nejpřesnějším řešením. Na celý model bylo použito asi 26 500 elementů. Na obr. č. 39 je pak detail oblasti mezi katodou a pomocnou anodou, pokrytý výpočetní sítí.



Obr. č. 38 – Pokrytí modelu výpočetní sítí

V dalším kroku jsem zadal zatížení na obě elektrody – napětí 20 kV na katodu a části s ní vodivě spojené a 0 V na pomocnou anodu a části s ní vodivě spojené.



Obr. č. 39 – Detail pokrytí modelu výpočetní sítí

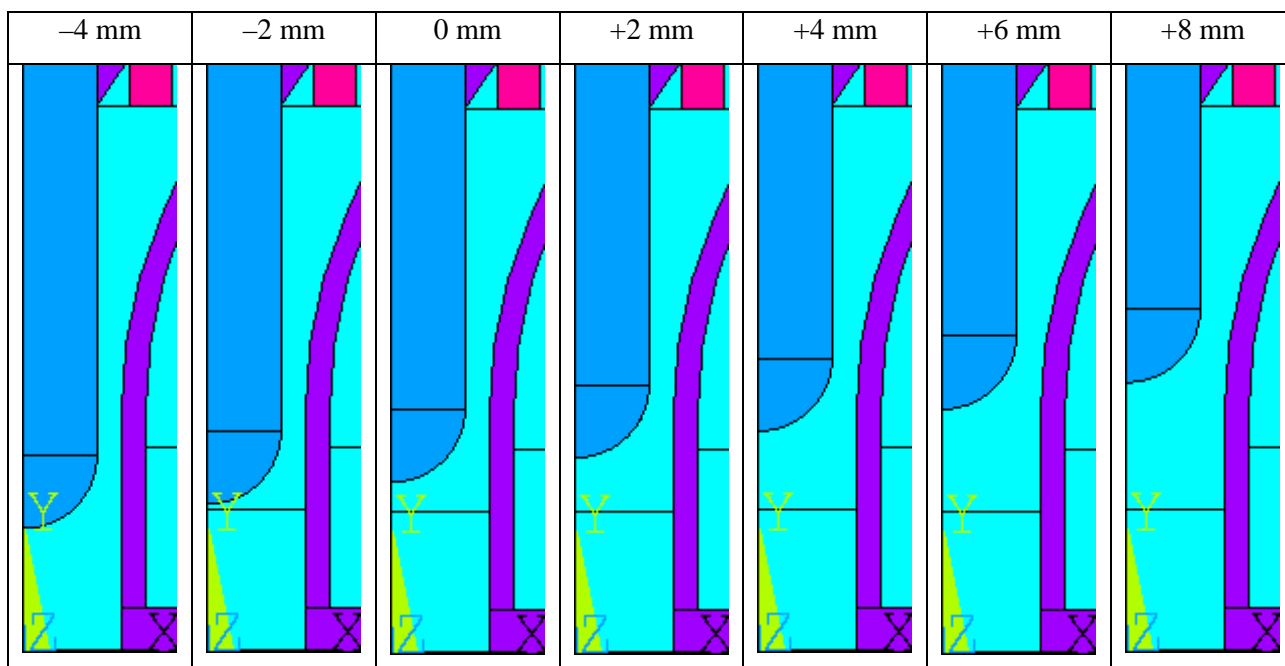
Poté, co jsem si připravil model (geometrie, materiálové vlastnosti, výpočetní síť a zatížení), následovalo již řešení označené v ANSYSu jako Solution. Jednalo se o analýzu statickou.

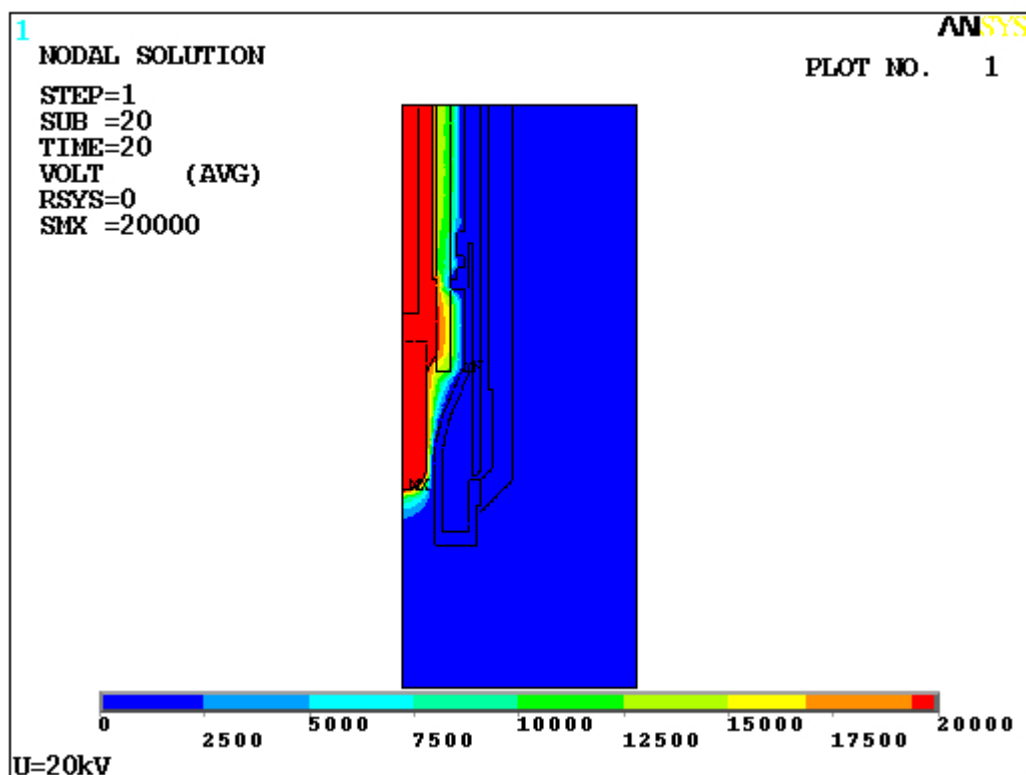
10. Vlastní řešení a výsledky simulace elektrostatického pole

Řešil jsem v programu ANSYS rozložení intenzity el. pole a rozložení el. potenciálu pro současné geometrické uspořádání plazmatronu (dále označeno jako poloha 0 mm). Dále jsem provedl tuto analýzu i pro 6 dalších poloh katody (tab. č. 3). Všechny polohy se liší pouze posunem katody ve směru osy Y. Ve dvou případech je katoda o něco níže než je současný stav (tyto polohy jsou dále značeny -2 a -4 mm) a ve čtyřech případech o něco výše (tyto polohy jsou dále značeny +2, +4, +6 a +8 mm). Pro každou jednotlivou polohu jsem vykreslil pomocí ANSYSu rozložení intenzity el. pole při napětích 1 kV – 20 kV po 1 kV (tedy 20 kroků), totéž u el. potenciálu (tedy opět 20 kroků pro každou polohu).

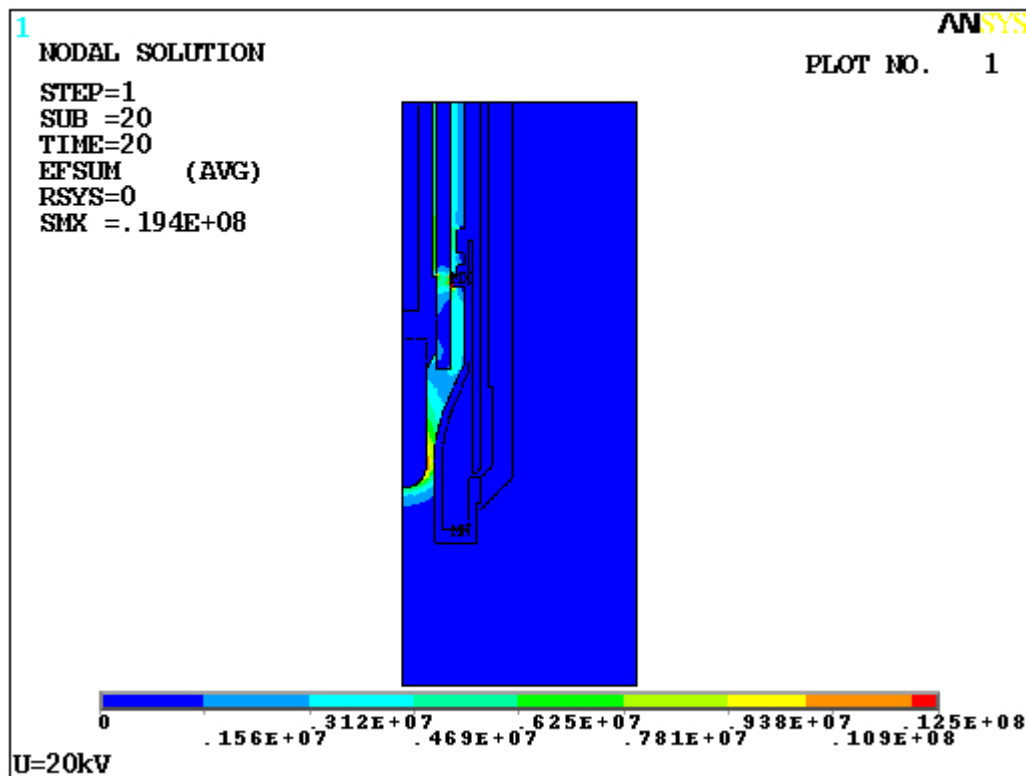
Výsledné rozložení el. potenciálu pro současnou polohu katody (0 mm) při napětí 20 kV je na obr. č. 40. Rozložení intenzity el. pole pro tutéž polohu při napětí 20 kV je na obr. č. 41. V tabulkách č. 4 a 5 je srovnání rozložení el. potenciálu a intenzity el. pole současné polohy při napětích 3, 6, 9, 12, 15 a 18 kV. Na obr. č. 42 jsou dva detaily z obr. č. 41, tedy rozložení intenzity el. pole při 20 kV pro současnou polohu. V příloze jsou pak souhrnné výsledky, tedy pro každou ze sedmi poloh katody 20 snímků s rozložením intenzity el. pole a 20 snímků s rozložením el. potenciálu. Tab. č. 6 a 7 pak ukazují rozložení intenzity el. pole při 10 kV a 20 kV v závislosti na poloze katody.

Tab. č. 3 – Detaily 7 různých modelů lišících se pouze posunem katody ve směru osy Y



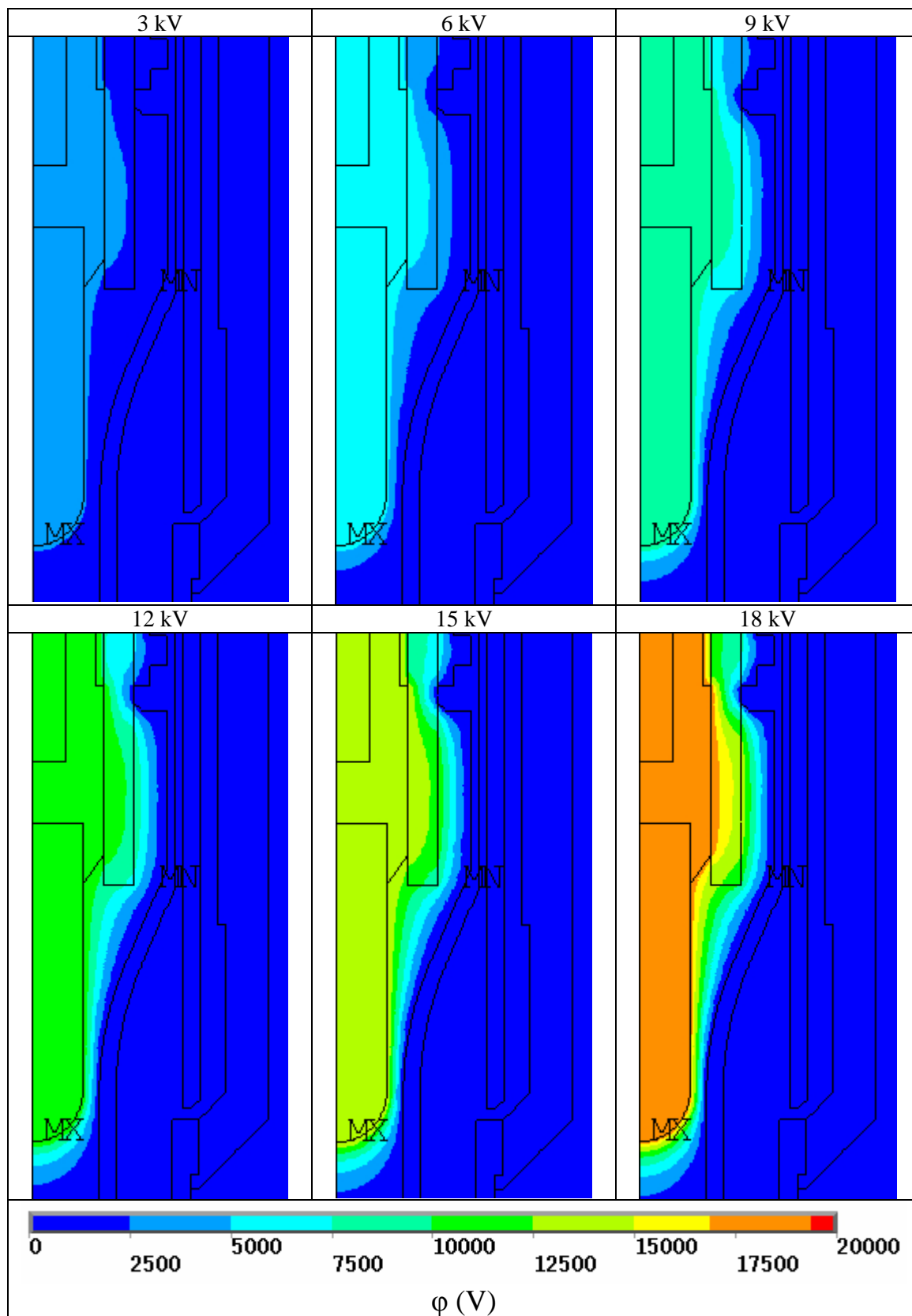


Obr. č. 40 – Rozložení el. potenciálu ϕ (V) při 20 kV – pozice katody 0 mm

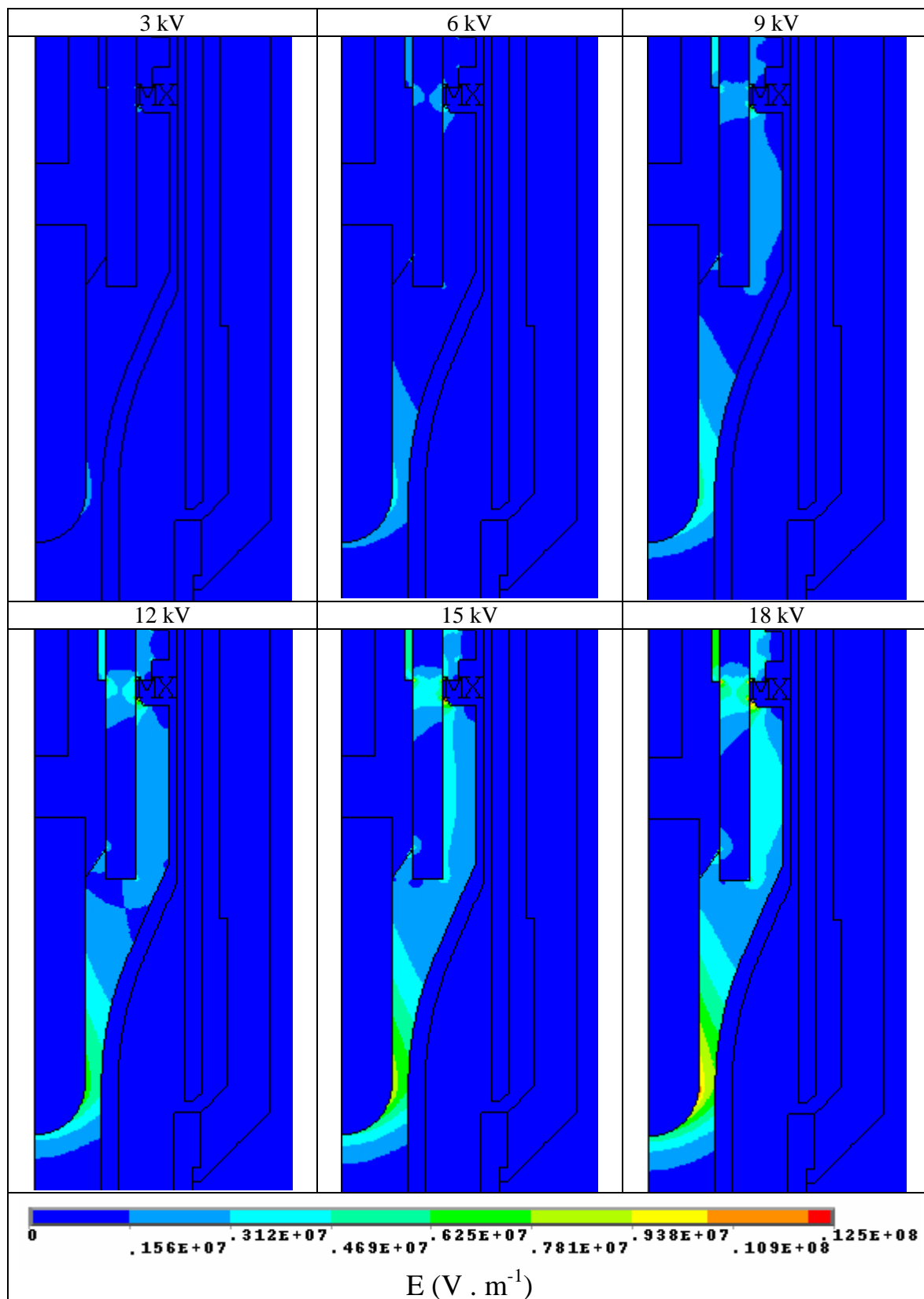


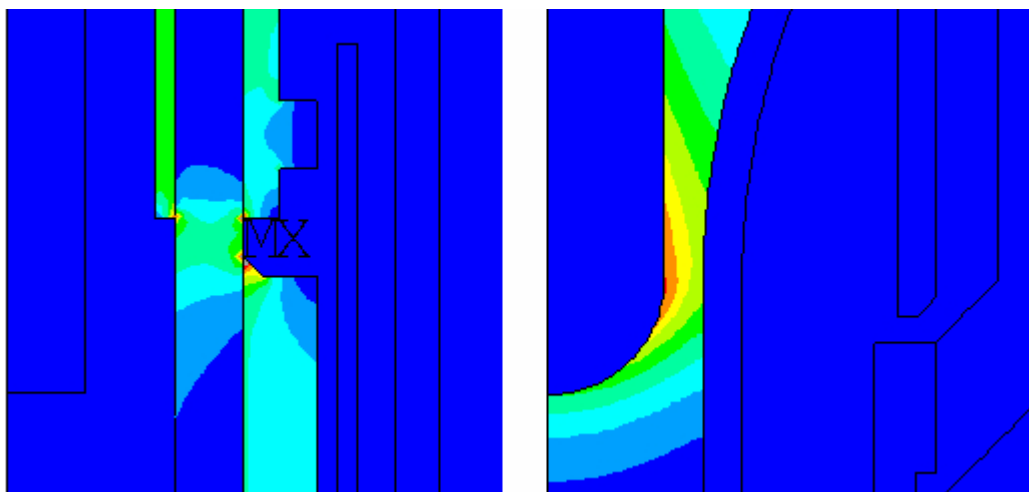
Obr. č. 41 – Rozložení intenzity el. pole E (V . m⁻¹) při 20 kV – pozice katody 0 mm

Tab. č. 4 – Rozložení el. potenciálu φ (V) při různém zatížení – poloha 0 mm



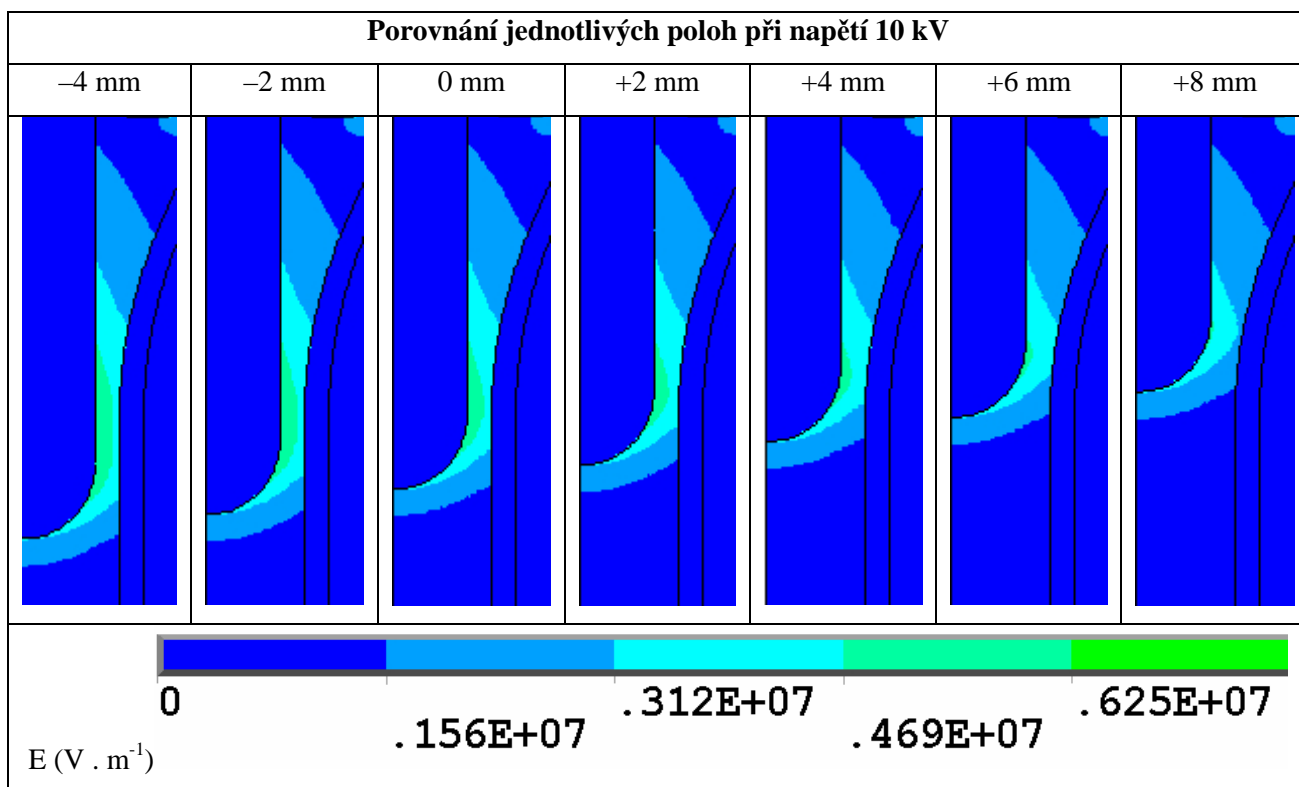
Tab. č. 5 – Rozložení intenzity el. pole E ($\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$) při různém zatížení – poloha 0 mm



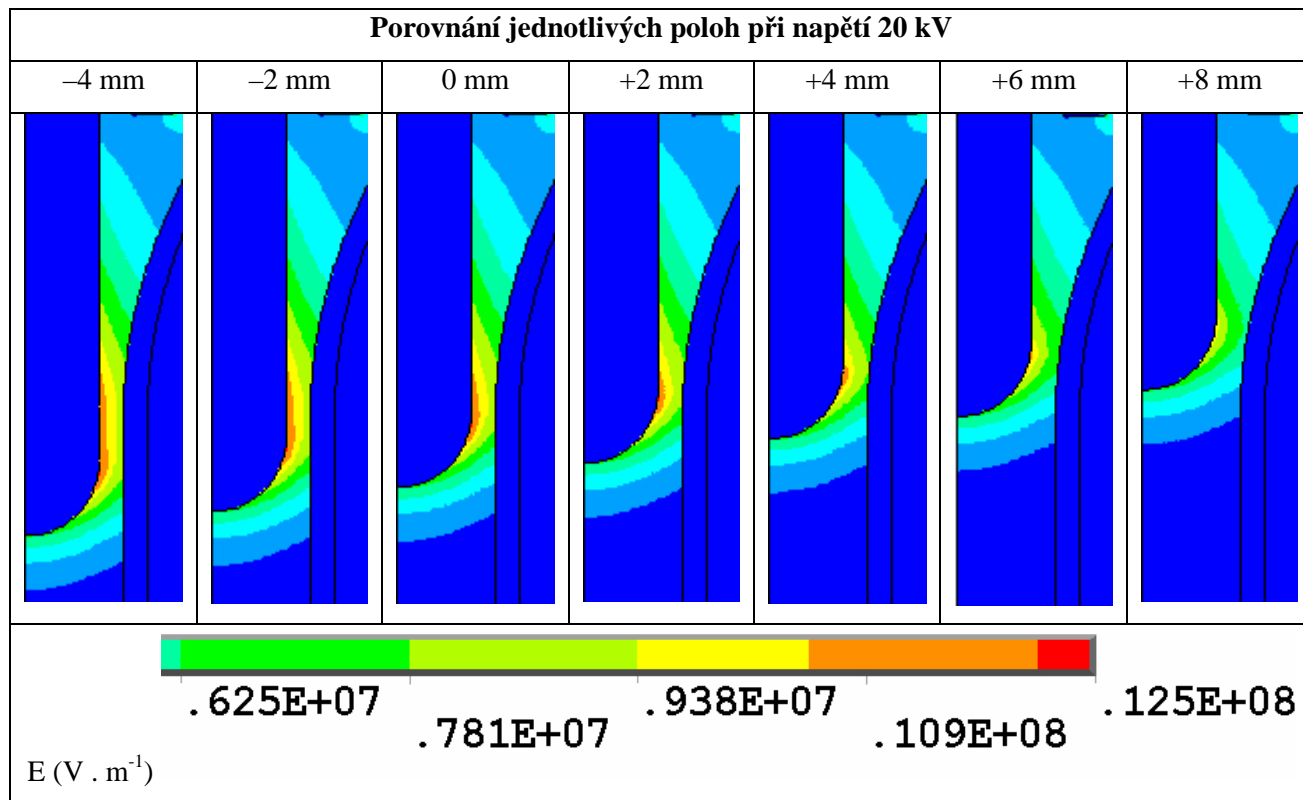


Obr. č. 42 – Detail rozložení intenzity el. pole E při 20 kV – poloha 0 mm (vlevo maximální hodnota, vpravo mezielektroodový prostor)

Tab. č. 6 – Srovnání rozložení elektrostatického pole pro různé polohy – Intenzita el. pole ($V \cdot m^{-1}$)



Tab. č. 7 – Srovnání rozložení elektrostatického pole pro různé polohy – Intenzita el. pole ($V \cdot m^{-1}$)



10. Závěr

Cílem této práce bylo zjistit skutečné geometrické uspořádání plazmatronu plazmové pece, která se nachází na půdě VŠB-TU Ostrava, vytvořit výkresovou dokumentaci základních součástí plazmatronu a simulací v programu ANSYS zjistit rozložení elektrostatického pole při iniciaci oblouku mezi katodou a pomocnou anodou. Výkresy jednotlivých funkčních částí plazmatronu s přesnými rozměry, vytvořené v programu AutoCAD, nejsou z důvodu utajení součástí práce ani příloh v elektronické podobě.

Z obr. č. 41 a 42, na kterých je vykresleno rozložení intenzity el. pole současného geometrického uspořádání plazmatronu při 20 kV, je dobře vidět rozložení intenzity el. pole mezi katodou a pomocnou anodou. Zajímavé je, že maximum (na obr. č. 41 označené jako MX, detail je pak na obr. č. 42 vlevo) se nenachází dole mezi elektrodami (nejmenší vzdálenost je 2 mm), ale nahoře na hrotu (ve 2D modelu, ve skutečnosti je to hrana) na anodě (nejmenší vzdálenost je 3,5 mm). S největší pravděpodobností to bude způsobeno tím, že je toto místo v modelu vykresleno jako ostrý roh, i když ve skutečném plazmatronu je tento roh dílenskou úpravou zaoblen s určitým poloměrem. Jak totiž bylo popsáno v kap. 6.1, ostré hrany výrazně zvyšují intenzitu el. pole. I přesto zde může při iniciaci el. oblouku docházet k nežádoucímu jiskření.

V tabulce č. 6 a 7 jsou uvedena výsledná rozložení intenzity el. pole E při zatížení 10 a 20 kV. Již zmíněná skutečnost, že maximum se nachází jinde než by podle očekávání mělo, způsobila, že můžeme jednotlivá výsledná rozložení intenzity el. pole spolu srovnávat podle jedné jediné stupnice. Maximum je totiž vždy v totožném bodě a má stejnou velikost pro všechny pozice katody.

Podle mého názoru má nejpriznivější rozložení intenzity el. pole stávající poloha katody (0 mm) a pak ještě přichází do úvahy posun o 2 mm v kladném směru osy Y (+2 mm). Polohy (-2 mm) a (-4 mm) mají rozložení příliš protáhlé a navíc tato pozice katody zvyšuje aerodynamický odpor pro proudící plazmotvorný plyn. Ostatní polohy (+4 mm, +6 mm a +8 mm) zase příliš zvětšují vzdálenost katoda-anoda a ztěžují iniciaci oblouku při startu pece.

Přínosem této práce pro mě osobně je, že jsem se mohl více dozvědět o problematice plazmových pecí a hořáků. Dále pak možnost bližšího seznámení se základními funkcemi a postupy při tvorbě 2D výkresové dokumentace v programu AutoCAD 2008 a 3D modelu v programu SolidWorks 2008. Stejně zajímavá pro mě byla i práce ve výpočetním programu ANSYS, který umožňuje s pomocí MKP řešit nejrůznější praktické úlohy.

11. Literatura

- [1] CHEN, F.F.: *Úvod do fyziky plazmatu*, Academia, Praha, 1984.
- [2] GROSS, B., GRYCZ, B., MIKLÓSSY, K.: *Technika plazmatu*, SNTL, Praha, 1967.
- [3] HAVELKA, O. A KOL.: *Elektrické přístroje*. SNTL, Praha 1985.
- [4] GROSS, B., HAVELKA, O.: *Elektrické přístroje II*, [skriptum], VUT, Brno, 1978.
- [5] DEMBOVSKÝ, V.: *Plazmová metalurgie*, SNTL, Praha, 1978.
- [6] DĚDEK, L.: *Teorie elektromagnetického pole*, [skriptum], VUT, Brno, 1990.
- [7] VOLDÁN, P.: *Silový napájecí systém plazmového generátoru rekrystalizační pece*, [diplomová práce]. VŠB-TU, Ostrava, 2008.
- [8] KAČOR, P.: *Metoda konečných prvků v elektrotechnické praxi*, [článek online].
[cit. 2010-03-29]. Dostupné z URL: <http://homen.vsb.cz/~kac37/_num_met_Kacor/>.
- [9] ANSYS HELP SYSTEM: *Basic Analysis Guide - Element PLANE 121*, [průvodce v programu ANSYS], verze 11.
- [10] SPIELMANN, M., ŠPAČEK, J.: *AutoCAD – Názorný průvodce pro verze 2008 a 2009*, Computer Press, Brno, 2008.

12. Obsah přílohy DVD

Příloha I – Rozložení intenzity el. pole E ve 20 krocích (1-20 kV) pro 7 poloh katody
(7 x PDF) + srovnání jednotlivých poloh při 10 kV (1 x PDF)

Soubory:

- 1E (-4mm).pdf
- 2E (-2mm).pdf
- 3E (0mm).pdf
- 4E (+2mm).pdf
- 5E (+4mm).pdf
- 6E (+6mm).pdf
- 7E (+8mm).pdf
- 8E (10kV).pdf

Příloha II – Rozložení el. potenciálu φ ve 20 krocích (1-20 kV) pro 7 poloh katody
(7x PDF) + srovnání jednotlivých poloh při 10 kV (1 x PDF)

Soubory:

- 1fi (-4mm).pdf
- 2fi (-2mm).pdf
- 3fi (0mm).pdf
- 4fi (+2mm).pdf
- 5fi (+4mm).pdf
- 6fi (+6mm).pdf
- 7fi (+8mm).pdf
- 8fi (10kV).pdf